METROLOJİ



METROLOJİ

© TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü
Bu yapıtın bütün hakları TÜBİTAK UME'ye aittir. TÜBİTAK UME'nin izini olmadan hiçbir bölümü kopya edilerek çoğaltılamaz. Kaynak gösterilmek şartı ile kitaptan alıntı yapılabilir.

TÜBİTAK

UME



METROLOJİ

TÜBİTAK UME

Metroloji

1. Basım, Şubat 2013 (1000 adet)

ISBN 978-975-403-731-9

© TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü

Bu yapıtın bütün hakları TÜBİTAK UME'ye aittir. TÜBİTAK UME'nin izini olmadan hiçbir bölümü kopya edilerek çoğaltılamaz. Kaynak gösterilmek şartı ile kitaptan alıntı yapılabilir.

TÜBİTAK UME
TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi
Barış Mah., Dr. Zeki Acar Cad. No:1
41470 Gebze – Kocaeli
Tel : (262) 679 50 00
Faks : (262) 679 50 01
E-posta : ume@tubitak.gov.tr
www.ume.tubitak.gov.tr

Sayfa Tasarımı : Sema SUBAT

Kapak Tasarımı: Uğur AKKAYA

Baskı:

Promat Basım Yayın San. ve Tic. A.Ş.
Sanayi Mah. 1673 Sok. No.34
Esenyurt – İstanbul
Tel : (212) 622 63 63
Faks : (212) 605 07 98
E-posta : info@promat.com.tr
www.promat.com.tr

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER i
ŞEKİLLER v
TABLOLAR xvi
ÖNSÖZ 1
1. METROLOJİ 3
1.1. Metrolojiye Giriş 3
1.2. Tarihçe 3
2. METROLOJİ TERİMLERİ VE KAVRAMLARI 16
2.1. Temel Terim ve Kavramlar 16
2.2. Yasal Metroloji ile İlgili Terim ve Kavramlar 21
3. ULUSLARARASI METROLOJİ SİSTEMİ 23
3.1. Bilimsel Metroloji 23
3.1.1 Metre Konvansiyonu ve Uluslararası Yapılanma 23
3.1.2 BIPM 24
3.1.3 Bölgesel Metroloji Organizasyonları 24
3.1.4 Ulusal Metroloji Enstitüleri 26
3.1.5 Yetkilendirilmiş Enstitüler 26
3.1.6 Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi (MRA) 27
3.2. Endüstriyel Metroloji 28
3.2.1 Kapsam Alanları 28
3.2.2 İzlenebilirlik 28
3.2.3 Akreditasyon 28
3.2.4 Uluslararası Laboratuvarlar Akreditasyon Birliği (ILAC) 28
3.2.5 Bölgesel Akreditasyon Organizasyonları 29
3.2.6 Ulusal Akreditasyon Kuruluşları 30
3.2.7 Çok Taraflı Anlaşma (MLA) 30
3.3. Yasal Metroloji 31
3.3.1 Yasal Metrolojinin Kapsam Alanları 33
3.3.2 Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu (OIML) 33
3.3.3 Yasal Metrolojiyle İrtibat Halinde Olan Organizasyonlar 34
3.3.4 Karşılıklı Kabul Düzenlemesi 34
3.3.5 Piyasa Gözetimi ve Denetimi 36
4. TÜRKİYE'DE METROLOJİ İLE İLGİLİ ORGANİZASYONLAR 39
4.1. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) 40
4.2. Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü 42
4.3. Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) 43
4.4. Türk Standardları Enstitüsü (TSE) 45
5. ULUSLARARASI BİRİMLER SİSTEMİ (SI) 46
5.1. Temel Birimler 46
5.2. Türetilmiş Birimler 47
5.3. Diğer Birimler 50

5.4. Birim Sembolleri ve Yazım Kuralları 52
5.5. Sayısal Gösterim 52
6. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ 53
6.1. Genel Tanımlar ve Kavramlar 55
6.2. Bileşik Standart Ölçüm Belirsizliği 67
6.3. Genişletilmiş Ölçüm Belirsizliği 67
6.4. Ölçüm Sonuçlarının Raporlanması 68
7. ÖLÇÜM ALANLARI 70
7.1. UZUNLUK ÖLÇÜMLERİ 70
7.1.1 UZUNLUK 70
7.1.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 70
7.1.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 73
7.1.2 AÇI 127
7.1.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 127
7.1.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 127
7.2. ZAMAN VE FREKANS ÖLÇÜMLERİ 133
7.2.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 133
7.2.1.2 Ölçüm Standartları 137
7.3. SICAKLIK VE NEM ÖLÇÜMLERİ 145
7.3.1 SICAKLIK 145
7.3.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 146
7.3.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 146
7.3.2 NEM 160
7.3.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 160
7.3.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 162
7.4. ELEKTRİK VE MANYETİZMA ÖLÇÜMLERİ 169
7.4.1 AKIM 169
7.4.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 169
7.4.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 173
7.4.2 GERİLİM 180
7.4.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 180
7.4.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 184
7.4.2.3 Yüksek Gerilim Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 201
7.4.3 DİRENÇ 208
7.4.3.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 208
7.4.3.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 215
7.4.3.3 AC Direnç Elde Edilmesi ve Dağıtımı 224
7.4.3.4 AC Direnç Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 226
7.4.4 İNDÜKTANS 227
7.4.4.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 227
7.4.4.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 232
7.4.5 KAPASİTANS 235
7.4.5.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 237
7.4.5.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 241

7.4.6 ELEKTRİKSEL GÜÇ VE ENERJİ 245
7.4.6.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 245
7.4.6.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 247
7.4.7 RF GÜÇ 256
7.4.7.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 256
7.4.7.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 258
7.4.8 ELEKTRİK YÜKÜ 264
7.4.8.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 264
7.4.8.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 265
7.4.9 MANYETİK ALAN VE MANYETİK AKI YOĞUNLUĞU 266
7.4.9.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 266
7.4.9.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 272
7.4.10 ELEKTRİK ALAN 278
7.4.10.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 278
7.4.10.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 283
7.5. KÜTLE VE TÜRETİLMİŞ BÜYÜKLÜKLERİN ÖLÇÜMLERİ 296
7.5.1 KÜTLE 296
7.5.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 296
7.5.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 302
7.5.2 KUVVET 309
7.5.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 309
7.5.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 314
7.5.3 HACİM VE YOĞUNLUK 318
7.5.3.1 Hacim SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 318
7.5.3.2 Yoğunluk SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 319
7.5.3.3 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 321
7.5.4 VİSKOZİTE 327
7.5.4.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 327
7.5.4.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 331
7.5.5 TORK 339
7.5.5.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 340
7.5.5.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 344
7.5.6 SERTLİK 348
7.5.6.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 348
7.5.6.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 351
7.5.7 BASINÇ 367
7.5.7.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 367
7.5.7.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 370
7.5.7.3 Vakum Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 385
7.6. FOTOMETRİK VE RADYOMETRİK ÖLÇÜMLER 393
7.6.1 IŞIK ŞİDDETİ 393
7.6.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 393
7.6.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 396
7.6.2 IŞIK AKISI 400

7.6.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 400
7.6.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 401
7.6.3 AYDINLIK DÜZEYİ 405
7.6.3.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 405
7.6.3.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 405
7.6.4 PARILTI 407
7.6.4.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 407
7.6.4.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 407
7.6.5 OPTİK GÜÇ 410
7.6.5.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 410
7.6.5.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 411
7.6.6 IŞINIM DÜZEYİ 419
7.6.6.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 419
7.6.6.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 419
7.6.7 IŞIMA 423
7.6.7.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 423
7.6.7.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 423
7.7. AKIŞKAN ÖLÇÜMLERİ 426
7.7.1 DEBİ 426
7.7.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 426
7.7.1.2 Gaz Akışı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 427
7.7.1.3 Sıvı Akışı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 432
7.8. AKUSTİK, ULTRASONİK VE TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİ 448
7.8.1 AKUSTİK - SES BASINCI 448
7.8.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 448
7.8.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 454
7.8.2 ULTRASONIK GÜÇ 457
7.8.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 457
7.8.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 457
7.8.3 TİTREŞİM - İVME 463
7.8.3.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı 464
7.8.3.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri 473
7.9. KİMYASAL METROLOJİ 476
7.9.1 MADDE MİKTARI 476
7.9.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi 476
7.9.2 KIMYASAL ÖLÇÜMLERDE KALİTE 478
7.9.2.1 Kimyasal Ölçümlerde Kalitenin Sağlanması 478
7.9.2.2 Metodun Geçerli Kılınması 480
7.9.2.3 Kimyasal Ölçümlerde Belirsizlik Hesaplaması 487
7.9.2.4 Kimyasal Ölçümlerde İzlenebilirliğin Sağlanması 492
7.9.2.5 Sertifikalı Referans Malzemeler 494
8. KAYNAKLAR 497
DİZİN 508

ŞEKİLLER

Şekil 1. Royal Cubit 4
Şekil 2. Metre Konvansiyonu belgesindeki Osmanlı Devleti adına Miralay Hüsnü Bey'in imzası 5
Şekil 3. Yazılı ilk standart niteliğini taşıyan Kanunname-i İhtisab-ı Bursa fermanı 6
Şekil 4. Metre Konvansiyonuna göre metrolojideki uluslararası yapılanma 24
Şekil 5. Kütle için metrolojide ölçüm standartları hiyerarşisi 31
Şekil 6. OIML ile irtibat halinde olan uluslararası, bölgesel ve diğer organizasyonlar 35
Şekil 7. Ülkelerin kalite alt yapıları için önemli unsurlar 39
Şekil 8. Metroloji ile ilgili organizasyonlar 39
Şekil 9. CIPM MRA'e üye ülkeler 42
Şekil 10. EA ve MLA üyesi ülkeler 44
Şekil 11. ILAC MRA üyesi ülkeler 44
Şekil 12. Karşılaştırma sonuçlarının grafiksel gösterimi 54
Şekil 13. Ölçüm sonucunun değerlendirilmesi 55
Şekil 14. Ölçüme ait devre şeması 57
Şekil 15. Ölçüm kesinliği, ölçüm doğruluğu ve ortalama değerin gösterimi 59
Şekil 16. Ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterim 64
Şekil 17. Metrenin tanımı ile endüstriyel uygulamalar arasındaki izlenebilirliği özetleyen akış diyagramı 71
Şekil 18. Uzunluk ölçümleri izlenebilirlik zinciri (% 95, k=2) 72
Şekil 19. Ölçüm skalası üzerinde boyutsal metrolojisi uygulama alanları 73
Şekil 20. SI birimlerinin zaman birimi saniye ile bağlantısı ve türetilmesi 75
Şekil 21. Yıllara göre mikrodalga ve optik standartlardaki gelişmeler 75
Şekil 22. Lazer rezonatörünün blok şeması ve He-Ne/I_2 lazerinin görüntüsü 76
Şekil 23. Lazer frekansının, atomların enerji geçişlerine kilitlenmesi deneyinin blok şeması 77
Şekil 24. Lazer frekanslarına uygun gelen atom ve molekülerin rezonans kalite faktörleri. 78
Şekil 25. Lazer frekansının, interferometre boyutuna kilitlenmesi deneyinin blok şeması 78
Şekil 26. İki lazer frekans farkının "beat" deneyi tekniği ile ölçülmesi 79
Şekil 27. İki Nd:YAG/I_2 lazerinin frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi 80
Şekil 28. İki He-Ne/I_2 lazerinin frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi 81
Şekil 29. fs COMB temelli lazer mutlak frekans ölçüm sisteminin blok şeması 81
Şekil 30. Ti:Sa femtosaniye COMB lazerinin görüntüsü 82
Şekil 31. Mastar blokları 83
Şekil 32. İnterferometrik ölçüm için hazırlanmış mastar blokları (Platenlara yapıştırılmış) 83
Şekil 33. Mastar bloklarının sınıfları ve aralarındaki farklar 84
Şekil 34. Mastar blok interferometresi kullanarak mastar blok kalibrasyonu 85
Şekil 35. Mastar blok komparatörleri kullanarak mastar blok kalibrasyonu 85
Şekil 36. Mastar bloklarının sınıflarına göre kullanımı ve izlenebilirliğin aktarımı 86
Şekil 37. Mastar blok yüzeylerinde meydana gelen hasarlar ve tespiti 87
Şekil 38. Mastar blok boyunca gönderilen Lazer ışını 88
Şekil 39. Mastar blok boyundaki ışığın dalgaboyunun (λ) tam (N) ve kesirli kısımlarının (Δl) hesaba katılarak mastar bloğun boyunun (L) elde edilmesi 88
Şekil 40. (a) Michelson İnterferometresi ışın optik yolları (b) Twyman-Green prensibine göre çalışan Mastar Blok İnterferometresi 89
Şekil 41. UME Köster uzun mastar blok interferometresi ve frekansı kararlı lazerler 90
Şekil 42. Düz, küresel ve bozulmuş ilerleyen dalga yüzleri 91
Şekil 43. Twyman-Green interferometresi 92

ŞEKİLLER

Şekil 44. Fizeau interferometresi 92
Şekil 45. Mach-Zehnder interferometresi 92
Şekil 46. Referans düz yüzey ile karşılaştırılarak elde edilmiş düz bir yüzeye ait 93
Şekil 47. Zygo Verifire AT Düzlemsellik İnterferometresi ve ölçümün şematik görüntüsü. 94
Şekil 48. Zygo Verifire AT Düzlemsellik İnterferometresi ve ölçümün şematik görüntüsü 94
Şekil 49. Sıfır saçak indirgeme işlemi 95
Şekil 50. Zygo Verifire At İnterferometresi ile ölçülen optik bir düzlemin MetroPro yazılımı görüntüsü. 95
Şekil 51. PV ve rms değerlerinin şematik gösterimi 96
Şekil 52. Optik referans yüzeyin paralellik ayarı yapılmamış saçak görüntüsü. 96
Şekil 53. Yüzeyin herhangi bir kesiti alınarak bu kesit boyunca yüzeyin profili 96
Şekil 54. Bir kusurlu yüzey üzerinde alınan interferans saçakları 97
Şekil 55. Bir kusurlu yüzey üzerinde alınan saçakların işlenmiş yüzey görüntüsü 97
Şekil 56. Üzerinde kanallar oluşmuş bir yüzeyden alınan saçakların işlenmiş yüzey görüntüsü 97
Şekil 57. Farklı tip mikrometreler 98
Şekil 58. Optik cam ile ölçüm çeneleri paralellik ölçümü 98
Şekil 59. Kumpaslar 99
Şekil 60. Farklı tip mihengirler 99
Şekil 61. Farklı tip ve şekildeki ölçü saatleri 100
Şekil 62. Çap standartları 101
Şekil 63. Halka, küre ve pim mastarlar 101
Şekil 64. Atölye mastarları 102
Şekil 65. UME üniversal ölçüm cihazı 103
Şekil 66. Lazer interferometre ile çap ölçümleri (UME) 103
Şekil 67. Bir silindir veya kürenin yuvarlaklık profili (radyal sapmalar yüzlerce kez büyütülmektedir) 104
Şekil 68. Düz bir yüzeyin doğrusallık ölçümü 105
Şekil 69. Silindirik bir parçanın karşılıklı yüzeylerinin birbirine paralelliği 105
Şekil 70. Yuvarlaklık parametresi ve teknik resimde gösterimi 106
Şekil 71. Doğrusallık parametresi ve teknik resimde gösterimi 106
Şekil 72. Paralellik parametresi ve teknik resimde gösterimi 106
Şekil 73. Diklik parametresi ve teknik resimde gösterimi 106
Şekil 74. Sınıf 1'den 4'e kadar yüzey sapmaları 107
Şekil 75. Form ölçüm cihazı 108
Şekil 76. Form ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri 109
Şekil 77. Form ölçüm cihazını kalibre etmekte kullanılan standartlar 109
Şekil 78. Bir flick standart ölçüm profili (Radyal sapmalar yüzlerce kez büyütülmüştür.) 110
Şekil 79. Sabit köprülü CMM 111
Şekil 80. Kolon CMM 111
Şekil 81. Hareketli mesnetli yatay kollu CMM 112
Şekil 82. Gantry CMM 112
Şekil 83. L-Şeklinde köprülü CMM 113
Şekil 84. Hareketli köprülü CMM 113
Şekil 85. Köprülü tip CMM 113
Şekil 86. CMM kalibrasyonunda kullanılan özel mastarlar 114
Şekil 87. R_a parametresi 115
Şekil 88. R_z ve R_{max} parametreleri 115
Şekil 89. Bir iş parçasının üzerinde pürüzlülüğün değerlendirileceği profilin tespiti 115
Şekil 90. Tipik bir pürüzlülük ölçüm grafiği 116
Şekil 91. İğne uçlu indüktif yüzey ölçüm cihazları 116

Şekil 92. Derinlik standartları 117
Şekil 93. Pürüzlülük standardı 117
Şekil 94. Pürüzlülük ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri 118
Şekil 95. Pürüzlülük ölçüm düzeneğinde oluşan titreşim/gürültüyü 118
Şekil 96. Şerit metreler 119
Şekil 97. Atölye cetvelleri 119
Şekil 98. Tek ve iki boyutlu cam skala örnekleri 119
Şekil 99. Adım (stage) mikrometresi örnekleri ve kullanıldığı sertlik ölçme cihazı 120
Şekil 100. Linescale kullanılan 5 m BENCH ve form cihazı üzerindeki görünümü 120
Şekil 101. Optik okumalı linescale ve linescale kullanabilen prob örnekleri 120
Şekil 102. Çözünürlük hedefleri 121
Şekil 103. Hassas cam skala 121
Şekil 104. Nanometrik skalalar 121
Şekil 105. Optik takımlama cihazları kullanımına örnek 122
Şekil 106. Her iki eksende ölçüm yapabilen mikrometrelere sahip ayar teleskopu ve her iki eksende ölçüm yapabilen optik mikrometre 123
Şekil 107. Cihazlarda bulunan hedef örnekleri ve her iki eksende ölçüm yapabilen optik mikrometre 123
Şekil 108. Kolimatörler 124
Şekil 109. Otomatik nivo, hassas nivo 124
Şekil 110. Otomatik nivolarda kompansatör sistemi 125
Şekil 111. Jig-Transit 125
Şekil 112. Elektronik teodolite 125
Şekil 113. Total station 125
Şekil 114. Radyanın tanımı 127
Şekil 115. Trigonometrik prensip ile uzunluk birimi “metre”den açı biriminin elde edilmesi 127
Şekil 116. Açı ölçümleri izlenebilirlik zinciri 128
Şekil 117. Dairenin bölünmesi ile açı biriminin elde edilmesi: Temel referans 2π radyan, tam daire 129
Şekil 118. Uzunluk biriminden açı birimi radyanın elde edilmesi 129
Şekil 119. Açı mastar blokları 130
Şekil 120. 12 yüzlü çelik poligon 130
Şekil 121. 1440 İndeks TABLA 130
Şekil 122. Otokolimatör 131
Şekil 123. Lazer interferometre açı optikleri 131
Şekil 124. Döner tabla 132
Şekil 125. Seviye ölçer 132
Şekil 126. Klinometre 132
Şekil 127. Açı ölçer, su terazisi ve gönye çok yaygın genel kullanıma sahip açı ekipmanlarıdır 132
Şekil 128. Evrensel Zaman Ölçeği (Universal Time Scale, UT1) 133
Şekil 129. Ephemeris Zaman Ölçeği (ET). 134
Şekil 130. ^{133}Cs Atomunun aşırı-ince yapısı (Hyperfine Structure). 134
Şekil 131. Zaman frekans sistemi izlenebilirlik piramidi 135
Şekil 132. Uluslararası zaman bağlantı organizasyonu 136
Şekil 133. Koordineli Evrensel Zaman UTC’nın gerçekleştirilmesi ve izlenebilirliğin sağlanması 136
Şekil 134. Frekans standartları rezonatörleri 137
Şekil 135. a) İlk gerçekleştirilen atomik saat, b) Yonga ölçekli atomik osilatör 137
Şekil 136. Atomik frekans standardı 138
Şekil 137. Tek Yönlü zaman dağıtımı 139
Şekil 138. Çift Yönlü zaman dağıtımı. 139

ŞEKİLLER

Şekil 139. Ortak görüş yöntemi 139
Şekil 140. Doğrudan frekans ölçüm yöntemi düzeneği 142
Şekil 141. Faz ölçüm yöntemi düzeneği 143
Şekil 142. İki frekans standardının GPS sistemi ile karşılaştırılması. 144
Şekil 143. Planck Işınım Kanunu 145
Şekil 144. ITS-90 uluslararası sıcaklık ölçeği 148
Şekil 145. ITS-90 UME sıcaklık ölçeği 149
Şekil 146. UME yapımı sabit nokta 149
Şekil 147. Suyun Üçlü Noktası (SÜN) faz diyagramı 150
Şekil 148. Standart platin direnç termometre 151
Şekil 149. Platin direnç termometre 152
Şekil 150. Termoelektrik akım devresi 153
Şekil 151. Platin bazlı ısılçift örneğinde buz noktasının referans noktası olarak kullanılarak elektriksel bağlantılarının yapılması 154
Şekil 152. Siyah cisim kavitesi 156
Şekil 153. Siyah cisim kavitesi 157
Şekil 154. Radyasyon termometre iç yapısı 158
Şekil 155. Sıcaklık ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri 159
Şekil 156. İki-basınç yöntemi ile çalışan nem kaynağı sistemi 163
Şekil 157. İki-sıcaklık yöntemi ile çalışan sistem 164
Şekil 158. İki-akış yöntemi ile çalışan sistem 164
Şekil 159. Tuz eriyikleri ile yapılan ölçüm 165
Şekil 160. Empedans bağıl nem sensörü ana bileşenleri 166
Şekil 161. Direnç bağıl nem sensörü ana bileşenleri 166
Şekil 162. Mekanik nem ölçer 166
Şekil 163. Rutubet ölçer 166
Şekil 164. Psikometre 167
Şekil 165. Nem ölçer izlenebilirlik zinciri 168
Şekil 166. SI Amper biriminin tanımı 171
Şekil 167. Mekanik birimler üzerinden elektriksel temel birim olan Amperin elde edilişi. 171
Şekil 168. RMS değerleri aynı olan AC ve DC akım, aynı direnç üzerinde eşit ısı oluştur 172
Şekil 169. DC Akım şöntü ile DC akım kaynağı kalibrasyonu 173
Şekil 170. DC akım şöntü kullanılarak multimetrenin “DC akım” fonksiyonu kalibrasyonu 173
Şekil 171. DC akım izlenebilirliği 174
Şekil 172. Isıl-çift yapılı bir Isıl Çevirici 175
Şekil 173. Isıl Çevirici-Şönt 175
Şekil 174. Muhafazalanmış Isıl Çevirici 176
Şekil 175. Çok eklemli ısıl çevirici 176
Şekil 176. Elektronik yapılı ısıl çevirici 177
Şekil 177. Isıl Çevirici ile AC Akım kaynağı ölçüm sistemi 178
Şekil 178. AC akım izlenebilirliği 179
Şekil 179. Volt’un SI birimlerinde elde edilmesi 180
Şekil 180. RMS değerleri aynı olan AC ve DC gerilim, aynı direnç üzerinde eşit ısı oluşturur 182
Şekil 181. Gerilim izlenebilirliğinin sanayide kullanılan ölçümlere aktarımı 183
Şekil 182. Doymuş Weston pilinin yapısı 184
Şekil 183. DC Josephson etkisi 186
Şekil 184. Josephson ekleminde oluşan sabit gerilim adımları (Shapiro adımları) 187
Şekil 185. Çeşitli zayıf eklem tipleri a) Nokta teması b) Mikroköprü c) Josephson eklemleri 188

Şekil 186. 1930-2000 yılları arasında DC gerilim ölçümlerinde uyum 189
Şekil 187. 10 Volt PTB dizisi çipi 190
Şekil 188. Konvansiyonel Josephson Gerilim Standardı Sistemi blok şeması 190
Şekil 189. DC gerilim standartlarının karşılaştırma yöntemi ile kalibrasyonu 191
Şekil 190. DC Gerilim Standartların karşılaştırılmasında kullanılan ölçüm sistemi 192
Şekil 191. Yalın bölücü 193
Şekil 192. Kelvin Varley Gerilim Bölücü yapısı 194
Şekil 193. Bir DC gerilim kalibratöründe PWMDAC 194
Şekil 194. DC gerilim izlenebilirliği 195
Şekil 195. Isıl-çift yapılı bir ısıl çevirici 196
Şekil 196. Tek eklemli ısıl gerilim çevirici 196
Şekil 197. Çok eklemli ısıl çevirici 197
Şekil 198. Elektronik yapılı ısıl çevirici 198
Şekil 199. Isıl çevirici ile AC gerilim ölçüm sistemi 199
Şekil 200. AC gerilim izlenebilirliği 200
Şekil 201. Dirençsel gerilim bölücünün temel eşdeğer devresi 201
Şekil 202. TÜBİTAK UME yapımı DC yüksek gerilim bölücü 202
Şekil 203. TÜBİTAK UME apımı AC/DC tepe değer ölçüm cihazı 202
Şekil 204. Gerilim transformatörlerinin temel devreleri a) Endüktif b) Kapasitif 203
Şekil 205. Kapasitif gerilim bölücünün temel eşdeğer devresi 204
Şekil 206. TÜBİTAK UME yapımı AC yüksek gerilim bölücü 204
Şekil 207. Standart yıldırım darbe dalga formu (1,2/50 µs) 205
Şekil 208. Standart anahtarlama darbe dalga formu (250/2500 µs) 205
Şekil 209. Darbe yüksek gerilim ölçümleri için küresel elektrot düzenleri 206
Şekil 210. Darbe yüksek gerilim bölücü 207
Şekil 211. Darbe yüksek gerilim kayıt cihazı 207
Şekil 212. Kuantum Hall Sisteminde platolar 209
Şekil 213. Yıllara göre, deneysel olarak 1 Ohm direncinin ve (h/e^2) ifadesinin elde edilme belirsizliklerinin değişimi 210
Şekil 214. UME Kuantum Hall Sistemi 211
Şekil 215. Düşük sıcaklık akım karşılaştırma köprüsü devre şeması 211
Şekil 216. Akım karşılaştırma köprüsü devre şeması 212
Şekil 217. BVD ile yapılan ölçüm köprüsü 213
Şekil 218. Klasik Wheatstone köprüsü 214
Şekil 219. Değiştirilmiş Wheatstone köprüsü 214
Şekil 220. Reichsanstalt tipi dirençler 215
Şekil 221. Rosa tipi standart direncin yapısı 216
Şekil 222. SR104 10 kΩ direnç standardı 216
Şekil 223. İki uçlu direnç ölçüm yöntemi 217
Şekil 224. Dört uçlu direnç ölçüm yöntemi 218
Şekil 225. Kullanılan sistemin şematik gösterimi 219
Şekil 226. İletkenlik ölçüm düzeneği 220
Şekil 227. Numunenin boyutsal ölçümlerinin gerçekleştirilmesi 220
Şekil 228. Van der Pauw bağlantı tekniği 221
Şekil 229. Van der Pauw yönteminde alınan ölçümler 221
Şekil 230. Dört uçlu prob blok şema 221
Şekil 231. Girdap Akımı çalışma prensibi 222
Şekil 232. AC İletkenlik Standartları 223

Şekil 233. Bir cismin DC gerilim uygulandığında gösterdiği direnç 223
Şekil 234. İki terminalli AC direnç eşdeğeri 223
Şekil 235. Koaksiyel hesaplanabilir direnç yapısı 224
Şekil 236. Quadrifilar hesaplanabilir direnç yapısı 225
Şekil 237. Dört uçlu direnç eşdeğer devresi 225
Şekil 238. Dört uçlu ekranlı direnç eşdeğer devresi 225
Şekil 239. Hesaplanabilir Karşılıklı İndüktans standardı (Science Photo Library'den alınmıştır) 227
Şekil 240. Paralel LC rezonans devresi 228
Şekil 241. Maxwell-Wien Köprüsü 229
Şekil 242. 3-gerilim yöntemi devre şeması 229
Şekil 243. İndüktans karşılaştırma köprüsü 230
Şekil 244. İndüktans biriminin hesaplanabilir kapasitörden elde edilmesi 231
Şekil 245. İndüktans biriminin Kuantum Hall direncinden elde edilmesi 232
Şekil 246. Standart indüktör 232
Şekil 247. Yüksek frekans uygulamaları için kullanılan standart indüktör 232
Şekil 248. İndüktans ölçümünde oluşan indüktanslar 233
Şekil 249. İndüktans ölçümünde kabloların bükülmesi 234
Şekil 250. (a) Paralel iki plaka (b) bu plakalar arasında oluşan elektrik alan çizgileri 235
Şekil 251. İletken plakalar arasındaki yalıtkan malzemenin elektrik alan çizgilerine etkisi 236
Şekil 252. Farklı gerilimle yüklenmiş başka bir iletkenin etkisi 236
Şekil 253. Elektrik alanın ekranlanması 237
Şekil 254. Sonsuz uzunluklu iletkenin dört parçaya bölünmesi 237
Şekil 255. Hesaplanabilir kapasitör 238
Şekil 256. Gerçekleştirilen hesaplanabilir kapasitör 238
Şekil 257. Hesaplanabilir kapasitörün çalışması 239
Şekil 258. De Sauty kapasitans karşılaştırma köprüsü 240
Şekil 259. İndüktif gerilim bölücü ile kapasitans karşılaştırması 240
Şekil 260. Kapasitans biriminin elde edilişi 241
Şekil 261. 3 Uçlu kapasitör gösterimi ve kapasitanslar 242
Şekil 262. 4 Uçlu ekranlı bağlantı şekli 244
Şekil 263. Güç ve enerji birim ve alt birimlerinin elde edilmesi ve dağıtımı 246
Şekil 264. Sayısal örnekleme ile güç ölçüm sisteminin blok diyagramı 247
Şekil 265. MJTC'lı güç ölçüm sisteminin blok diyagramı 248
Şekil 266. Sekonder beslemeli kompanzasyonlu akım karşılaştırıcısı kullanılarak yapılan akım transformatörü kalibrasyon sistemi 249
Şekil 267. Primer beslemeli, kompanzasyonlu akım karşılaştırıcısı kullanılarak yapılan akım transformatörü kalibrasyon sistemi 251
Şekil 268. Yardımcı transformatör ve kompanzasyonlu akım komparatörü kullanılarak yapılan akım transformatörü kalibrasyon sistemi 252
Şekil 269. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Kapasitif bölücü yöntemi 253
Şekil 270. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Rezistif bölücü yöntemi 253
Şekil 271. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Pseudo köprüsü yöntemi 254
Şekil 272. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Karşılaştırmalı dengeleme yöntemi 254
Şekil 273. Gerilim transformatörü kalibrasyonu - Akım komparatörü kapasitans oran yöntemi 255
Şekil 274. Gerilim transformatörü kalibrasyonu - Karşılaştırma yöntemi 255
Şekil 275. Mikrodalga güç ölçüm sistemi blok şeması 256
Şekil 276. RF güç standartlarının izlenebilirlik zinciri 257
Şekil 277. Mikrokalorimetre sistemi 258

Şekil 278. Barreter ve thermistorun sıcaklık katsayıları 259
Şekil 279. Otomatik köprü ile güç ölçüm sistemi 259
Şekil 280. Isılçift prensip şeması 260
Şekil 281. Isılçift güç ölçüm devresi 261
Şekil 282. Eş eksenli iletim hattına yerleştirilmiş diyot şeması 261
Şekil 283. Diyot karakteristiği 262
Şekil 284. Diyot ile güç ölçüm devresi 263
Şekil 285. Pozitif - negatif elektrik yükleri ve oluşturdukları elektrik alan 264
Şekil 286. Elektrometre (Üretici: Keithley, Model: 6514) 265
Şekil 287. Gerilim kalibratörü ve kapasitans standardı ile referans elektrik yükü elde edilmesi 265
Şekil 288. Bobin ile oluşturulan manyetik alan çizgileri 266
Şekil 289. Manyetik moment 268
Şekil 290. Manyetik bölgelerin dış manyetik alan yokken (Sol taraftaki) ve uygulandığındaki durumları 272
Şekil 291. Manyetik alan sensörleri alan şiddeti ve ölçüm bölgesine göre iki kategoriye ayrılır: düşük alan ölçümü için manyetometreler ve yüksek alan ölçümü için gaussmetreler 273
Şekil 292. Nükleer devinim. Kendi ekseni etrafında dönen bir protona H_a gibi bir manyetik alanın uygulanması durumunda yalpalama hareketi yapmaktadır (topaç hareketi). 274
Şekil 293. Hall etkisi. 275
Şekil 294. Farklı popüler fluxmetre tasarımı 276
Şekil 295. Yönü ile verilen yüzeydeki her bir nokta yüzey normali olarak adlandırılır. Bir noktadan geçen manyetik akı manyetik alanın bu yöndeki bileşenidir. 276
Şekil 296. Tipik bir akımetre cihazı görünümü 276
Şekil 297. TEM hücresinin yandan görünüşü 281
Şekil 298. TEM hücresi kullanımı ile elektrik alan üretimi ve elektrik alan sensör kalibrasyonu 282
Şekil 299. Horn anten kullanımı ile elektrik alan üretimi ve elektrik alan sensör kalibrasyonu 283
Şekil 300. Desen gösteriminde kullanılan koordinat sistemi 284
Şekil 301. Üç boyutlu simetrik bir desen örneği 284
Şekil 302. Yönlü bir anten ve deseni 285
Şekil 303. ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi gösterimi 291
Şekil 304. ANSI IEEE C63.5 üç anten yönteminde bir anten çiftinin ölçümü 292
Şekil 305. EN 55022 standardı uyarınca elektrik alan seviyesi ölçümleri 293
Şekil 306. EN 55022 masa-üstü cihazlar için deney düzeneği 294
Şekil 307. MIL-STD 461 uyarınca elektrik alan seviyesi ölçümleri 294
Şekil 308. MIL-STD 461 masa-üstü cihazlar için deney düzeneği 295
Şekil 309. Çok eksenli monopol ve ortogonal dipol elektrik alan problarının fotoğrafları 295
Şekil 310. Ortogonal dipol elektrik alan probların iç yapısı 295
Şekil 311. Uluslararası kilogramprototipi ve 6 yasal kopyası 300
Şekil 312. Uluslararası kilogramprototipi 300
Şekil 313. Kütle standartları izlenebilirlik zinciri 301
Şekil 314. Silindir biçiminde kütle standartları ve mg ağırlıklar 303
Şekil 315. BIPM ve UME'de kullanılan Mettler HK1000MC ve UME-One Prototip Teraziler 305
Şekil 316. Elektromanyetik kuvvet kompansazyonlu komparatör terazinin şematik diyagramı 305
Şekil 317. Monoblok tartım hücresi (Mettler-Toledo AG ve Sartorius AG) 306
Şekil 318. a) Referans standardı Ulusal Kilogram Prototip olan, 8 adet bilinmeyen kütle standartlı tartım şemaları b) Her bir şemada 3 ve 10 adet tartım denklemi içeren 1 kg - 100 g arası kadar kütle skalası örneği 308
Şekil 319. SI-Birimler ağacında kuvvet birimi Newton'un yeri 309
Şekil 320. Kuvvet skalasında izlenebilirlik 312

ŞEKİLLER

Şekil 321. Kuvvet ölçüm büyüklüğü Newton'un (N) sanayiye yaygınlaştırılması 313
Şekil 322. UME 110/1100 kN ölü ağırlıklı manivela büyütmeli kuvvet standardı makinesi 315
Şekil 323. UME 11 kN kuvvet standardı makinesi 315
Şekil 324. Piezoelektrik malzemelerin kullanım şekilleri 315
Şekil 325. Ölçme halkası 316
Şekil 326. Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları 317
Şekil 327. Hacim biriminin izlenebilirlik zinciri 318
Şekil 328. Yoğunluk biriminin izlenebilirlik zinciri 319
Şekil 329. TÜBİTAK UME referans yoğunluk standardı 320
Şekil 330. Hidrostatik tartım sistemi düzeneği 322
Şekil 331. Referans sıvı yoğunluğu belirleme sistemi ölçüm düzeneği 323
Şekil 332. Hidrometre kalibrasyonu ölçüm düzeneği 324
Şekil 333. Moleküler katmanlar ve akış durumu 327
Şekil 334. Newtonian sıvıların akış karakteristik durumu 328
Şekil 335. Non-newtonian sıvıların akış karakteristik durumu 328
Şekil 336. Bazı sıvılar ve gazlar için kinematik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi 329
Şekil 337. TÜBİTAK UME viskozite standardı (Viskozite Skalası) 332
Şekil 338. Viskozite birimi izlenebilirlik zinciri 338
Şekil 339. Falling Ball viskometre 333
Şekil 340. Ubbelohde viskometre 334
Şekil 341. Ubbelode viskometre doldurma şekli 335
Şekil 342. Kinematik viskozite ölçüm düzeneği 335
Şekil 343. Tork (dönme momenti) 339
Şekil 344. Tork uygulamasına bir örnek, vidalı bağlantı 339
Şekil 345. SI Birim ağacında tork biriminin yeri 341
Şekil 346. Tork biriminin elde edilmesi. Tork standardı makinesinin şematik görünümü 341
Şekil 347. Tork biriminin elde edilmesi için kullanılan fiziksel model 342
Şekil 348. Tork standardı makinelerinin (tork kalibrasyon makinelerine) etki eden parametrelerin genel ifadesi 343
Şekil 349. Tork ölçüm zinciri 344
Şekil 350. Hassas tork ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için yaygın kullanılan ölçüm dizgisi şeması örneği 345
Şekil 351. Basit tork ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan ölçüm dizgisi şeması örneği 345
Şekil 352. Sertlik uçları 349
Şekil 353. Sertlik ölçeğinin oluşturulması ve izlenebilirlik zinciri 350
Şekil 354. Mohs sertlik ölçüm standardı (a) ve numunesi (b) 351
Şekil 355. Dinamik sertlik ölçüm prensibi ve cihazı 352
Şekil 356. Rockwell sertliği ölçme prensibine göre ucun malzeme içindeki konumları 353
Şekil 357. Rockwell Sertlik prensibine göre HRC'ye ait kuvvet uygulama döngüsü 354
Şekil 358. Rockwell sertlik prensibine göre HRC'ye ait uç hareket döngüsü 354
Şekil 359. Rockwell sertliği ölçüm sonucunun ifadesi 354
Şekil 360. Brinell sertlik ölçüm prensibi ve meydana gelen izin görüntüsü 357
Şekil 361. Brinell sertlik ölçümü sonucunda meydana gelen iz görüntüsü 357
Şekil 362. Brinell Sertliği Ölçüm Sonucunun İfadesi 358
Şekil 363. Vickers sertliği ölçüm için iz oluşturma (a) ve iz ölçümü (b) 359
Şekil 364. Vickers sertlik ölçümü sonucunda meydana gelen iz görüntüsü 359
Şekil 365. Vickers sertliği ölçüm sonucunun ifadesi 360
Şekil 366. Knoop sertliği elmas ucunun şekli 361

Şekil 367. Knoop Sertlik ölçümü sonucunda meydana gelen iz görüntüsü 361
Şekil 368. Knoop sertliği ölçüm sonucunun ifadesi 362
Şekil 369. Shore sertlik ölçüm prensibi 363
Şekil 370. IRHD sertlik ölçme cihazı 364
Şekil 371. UME sertlik standardı makineleri 365
Şekil 372. Sertlik test cihazları 365
Şekil 373. Sertlik referans blokları 366
Şekil 374. Aynı derinlikte tüm noktalarda basınç aynıdır 367
Şekil 375. Basınç birimi türetilmiş bir birimdir 368
Şekil 376. Barometrik basınç ve irtifa 368
Şekil 377. Basınç ölçüm modlarının şematik gösterimi 369
Şekil 378. Sıvılı manometrenin temel çalışma prensibi 370
Şekil 379. Basit tip piston silindir yapısı şematik gösterimi 371
Şekil 380. Hidrolik ve pnömatik pistonlu basınç standartları 372
Şekil 381. Pnömatik pistonlu mutlak basınç standardı 372
Şekil 382. Piston-silindir ünitesi kalibrasyon düzeneği 373
Şekil 383. Manometre 374
Şekil 384. Basınç ölçümünde kullanılan elastik elemanlar 375
Şekil 385. Bourdon tüplü basınç ölçer 376
Şekil 386. Manometrelerin yapısal elemanları 377
Şekil 387. Negatif basınç ve vakum ölçen manometreler 377
Şekil 388. Birleşik manometre 377
Şekil 389. Çift ibreli manometre 378
Şekil 390. Çift skalalı manometre 378
Şekil 391. Retard manometre 379
Şekil 392. Suppressed manometre 379
Şekil 393. Basınç dönüştürücü şematik gösterimi 381
Şekil 394. Piezoelektrik etkiyi oluşturan hareketler 382
Şekil 395. Yapıştırılmayan tip gerinim ölçer 383
Şekil 396. Wheatstone köprüsü 383
Şekil 397. Yapıştırılabilir tip gerinim ölçe 384
Şekil 398. Statik genleşme yöntemi 387
Şekil 399. Dinamik genleşme yöntemi 388
Şekil 400. Simetrik konfigürasyonda çift taraflı kapasitans diyafram ölçer 389
Şekil 401. SRG vakum ölçer 390
Şekil 402. Pirani vakum ölçer 391
Şekil 403. Vakumda izlenebilirlik şeması 392
Şekil 404. Elektromanyetik tayf 393
Şekil 405. CIE tarafından 1924 yılında belirlenen insan gözünün ışığa (V(λ)) 394
Şekil 406. Işık şiddeti 395
Şekil 407. Katı açı 395
Şekil 408. a) Filtre-radyometrenin şematiği, b) Fotodiyotların tuzak dedektör içerisindeki dizilişi 397
Şekil 409. Işık şiddeti ölçüm sistemi. SM - servo motor, DHS - doğrusal hareket sistemi 398
Şekil 410. Işık akısı biriminin elde edilmesi prensibi 400
Şekil 411. Bir gonyofotometre ile taranan küresel yüzey 401
Şekil 412. Toplama küresi tabanlı ışık akısı ölçüm prensibi 402
Şekil 413. Toplama küresi tabanlı ışık akısı ölçüm düzeneği 403
Şekil 414. Göreceli ölçüm hassasiyetinin küre iç kaplamasının yansıtma katsayısına göre değişimi 404

Şekil 415. Aydınlık düzeyi 405
Şekil 416. Parıltı 407
Şekil 417. Parıltı ölçüm düzeneği 408
Şekil 418. Mesafeye bağlı geometrik düzeltme katsayısı değişimi 409
Şekil 419. Birincil seviye krayojenik radyometre 412
Şekil 420. Yansıma tipi silikon fotodiyot tabanlı tuzak dedektörün geometrik dizilimi. 414
Şekil 421. Dedektör duyarlılığının belirlenmesi 415
Şekil 422. Silikon fotodiyodun tayfsal duyarlılığı 416
Şekil 423. Isıl bir dedektörün (Pyroelektrik) tayfsal yansıma ve duyarlılık değerleri 417
Şekil 424. Karşılaştırmalı yöntem ile duyarlılık ölçüm sistemi 418
Şekil 425. Karşılaştırmalı yöntem ile elde edilen çeşitli dedektörlerin duyarlılık değerleri 418
Şekil 426. Işıma yapan bir elektromanyetik kaynağın ışınım düzeyi/ışıma parametrelerinin elde edilmesi 420
Şekil 427. Filtre radyometre tabanlı tayfsal/toplam ışınım düzeyi ölçüm düzeneği 421
Şekil 428. Filtre radyometre tabanlı tayfsal/toplam ışıma ölçeğinin oluşturulması 423
Şekil 429. Bell Prover kalibrasyon sisteminin şematik gösterimi 427
Şekil 430. Cıvalı piston sisteminin şematik gösterimi 428
Şekil 431. PVTt sistemi şematik gösterimi 428
Şekil 432. Tartım esaslı gaz debi kalibrasyon sisteminin şematik gösterimi 429
Şekil 433. Referans sayaçların kalibrasyonda kullanılması 430
Şekil 434. Sonik Lüle, rotarymetre ve ıslak tip sayaç 430
Şekil 435. Türbinmetrenin ölçüm hattına bağlanması ve akış doğrultucularının konumlandırılması. 430
Şekil 436. Kütlesel debi ölçüm sistemi. 432
Şekil 437. Diverter çalışma eğrisi 433
Şekil 438. Örnek bir Türbinmetrenin iç yapısı. 435
Şekil 439. Elektromanyetik debimetre prensibinin şematiksel gösterimi 436
Şekil 440. Coriolis kütlesel debimetrelerin çalışma prensibinin şematiksel gösterimi 437
Şekil 441. Açık devre rüzgar tüneli kesit çizimi ve fotoğrafı. 438
Şekil 442. Kapalı devre rüzgar tüneli kesiti ve fotoğrafı. 439
Şekil 443. İleri doğru yansımalı tek hız bileşenli çift ışık demetli LDA düzeneği 440
Şekil 444. İki lazer demetinin oluşturduğu girişim saçakları 441
Şekil 445. TÜBİTAK UME Döner Disk Sistemi fotoğrafı. 442
Şekil 446. Statik-pitot tüp 443
Şekil 447. Kızgın tel anemometresi ölçüm probu. 444
Şekil 448. Pervaneli anemometre örnekleri 445
Şekil 449. Sonik hava hız ölçer 446
Şekil 450. Akışkan hızı ve ses yayılım hızı. 446
Şekil 451. Kapasitif mikrofon tipleri 449
Şekil 452. Kapasitif mikrofonun yapısı 450
Şekil 453. Karşılıklık kalibrasyon sırasında mikrofon ve bağlaşımların birleşimi 451
Şekil 454. Lazer pistonfonu 452
Şekil 455. Akustik ölçümlerde izlenebilirlik zinciri 453
Şekil 456. Mikrofonların karşılaştırma kalibrasyonu düzeneği 454
Şekil 457. Ses basıncı izlenebilirliğinin alt seviyelere aktarımı 455
Şekil 458. Mikrofon kalibrasyonları için aktif bağlaşım 456
Şekil 459. Ultrasonik alanında kullanılan izlenebilirlik şeması 458
Şekil 460. Ultrasonik güç ölçüm düzeneği: Ultrasonik yayınım yukarı doğru 459
Şekil 461. TÜBİTAK UME'de kurulu ultrasonik güç ölçüm düzeneği 459

Şekil 462. Ultrasonik güç ölçüm düzeneği: Ultrasonik yayınım aşağı doğru 460
Şekil 463. Tam yutucu hedef 460
Şekil 464. Referans standart niteliğindeki ivme ölçerler 464
Şekil 465. Girişim deseni sayma metodunda kullanılan kalibrasyon düzeneği 467
Şekil 466. Bessel Fonksiyonlarının x parametresine göre değişimi 468
Şekil 467. Çift çıkışlı homodyne lazer interferometresi 469
Şekil 468. Sinüs yaklaşımı yöntemi için ölçüm sistemi 470
Şekil 469. Sinüs yaklaşımı yöntemi için kullanılan ölçüm sistemi örneği 471
Şekil 470. İvme ölçerlerin karşılaştırma kalibrasyonu düzeneği 474
Şekil 471. Titreşim uyarıcı kalibrasyonu düzeneği 474
Şekil 472. Titreşim ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri 475
Şekil 473. İki farklı ölçüme ait veriler ile yapılan duyarlılık değerlendirmesi 483
Şekil 474. Kalibrasyon grafiği. 485

TABLOLAR

Tablo 1. Temel SI birimleri 47
Tablo 2. Temel SI birimleri ile ifade edilen türetilmiş SI birimler 48
Tablo 3. Özel isim ve sembolleri olan türetilmiş SI birimleri 48
Tablo 4. Özel isim ve sembolleri olan türetilmiş SI birimleri (*Devam*) 49
Tablo 5. İsimleri ve sembolleri, türetilmiş SI birimlerinin özel isim ve sembollerini içeren türetilmiş SI birimleri 49
Tablo 6. İsimleri ve sembolleri, türetilmiş SI birimlerinin özel isim ve sembollerini içeren türetilmiş SI birimleri (*Devam)* 50
Tablo 7. Kabul edilen SI harici birimler 50
Tablo 8. Belirli konu alanlarında kullanımları kabul edilen SI harici birimler 51
Tablo 9. Belirli konu alanlarında kullanımları kabul edilen ve değerleri deneysel olarak belirlenen SI harici birimler 51
Tablo 10. Laboratuvarlararası karşılaştırma sonuçları 53
Tablo 11. Ölçüm sonuçları 63
Tablo 12. Student dağılımı ile normal dağılım arasındaki farkı dengeleme faktörü 65
Tablo 13. Yüzey düzensizliklerinin sınıflandırılması 107
Tablo 14. Zaman ve frekans dağıtım yöntemleri 140
Tablo 15. Kalibrasyonda kullanılan banyolar ve sıcaklık aralıkları 155
Tablo 16. Örnek ısıl çevirici AC-DC transfer fark tablosu 178
Tablo 17. Örnek ısıl gerilim çevirici AC-DC transfer fark tablosu 199
Tablo 18. Alan şiddeti ölçer cihaz karakteristikleri 273
Tablo 19. EN 55022 elektrik alan limitleri 293
Tablo 20. Kütle birimi dönüşüm tablosu 300
Tablo 21. OIML R 111'e göre doğruluk sınıfları için bağıl standard belirsizlikler ($U_c/M_k \leq Mpe/6$) ve bağıl maksimum müsaade edilen hatalar (mpe/m_K) 303
Tablo 22. OIML R 111'e göre ağırlıklar için müsaade edilen yüzey pürüzlülüğünün maksimum yüksekliği ve ortalama değerleri ($m_k \leq 50$ kg) 303
Tablo 23. OIML R 111'e göre ağırlıklar için verilen manyetik alınganlık değerleri 304
Tablo 24. OIML R 111'e göre ağırlıklar için verilen sürekli manyetik polarizasyon değerleri 304
Tablo 25. Çeşitli birim sistemlerinde temel birimlerle kuvvet birimi arasındaki ilişki 310
Tablo 26. Newton'un İkinci Kanununda için K-sabiti 310
Tablo 27. Hacim birimi dönüşüm tablosu 319
Tablo 28. Yoğunluk birimi dönüşüm tablosu 320
Tablo 29. Dinamik viskozite dönüşüm tablosu 330
Tablo 30. Kinematik viskozite dönüşüm tablosu 330
Tablo 31. Kapiler tüplü viskometreler 334
Tablo 32. Tork birimleri için dönüşüm oranları. 340
Tablo 33. Tork ölçme cihazlarının kalibrasyonu esnasında dikkate alınan olası parametreler. 345
Tablo 34. Tork ölçme cihazlarının belirsizliğine etki eden parametrelerin dağılım fonksiyonları 347
Tablo 35. Rockwell sertlik ölçekleri 355
Tablo 36. Rockwell sertlik ölçekleri hesaplamaları ve birimleri 356

Tablo 37. Brinell sertlik ölçekleri 358
Tablo 38. Vickers sertlik ölçekleri 360
Tablo 39. Knoop sertlik ölçekleri 362
Tablo 40. İkincil basınç ölçerler için fiziksel özellikler 374
Tablo 41. Elastik elemanlardaki basınç ölçüm aralıkları 375
Tablo 42. Basınç birimleri dönüşüm tablosu 385
Tablo 43. Vakum alanındaki birincil ve ikincil seviye standartlar 386
Tablo 44. Vakum aralıkları ve basınç değerleri 386
Tablo 45. Fotometride ve radyometride kullanılan büyüklükler ve birimleri 394
Tablo 46. TÜBİTAK UME'de ölçülebilen optik güç seviyeleri 410

ÖNSÖZ

İnsanoğlu var olduğu sürece ölçmeye ihtiyaç duymuştur. Eski çağlarda insan duyu organlarının tepkileri, vücut ölçüleri gibi ilkel ölçme araçları ile yapılan ölçümler bugün ölçüm bilimi olarak bildiğimiz metrolojinin temelini oluşturmuştur. Zamanı ölçmede kullanılan güneş saati, uzunluk ölçümünde kullanılan basit bir çubuk, tartım işlemlerinde kullanılan ağırlıklarla başlayan bu serüven, günümüzde ihtiyaçlar doğrultusunda kuantum sabitlerine dayalı nano ölçeğindeki olağanüstü hassas ölçümlere ulaşmıştır.

Metroloji, farkına varmasak bile günlük yaşamımızın ayrılmaz bir parçasıdır. Marketlerde, hastanelerde, pazarlarda yapılan ölçümleri sıradan ve rutin bir faaliyet olarak algılamaktayız. Oysa yapılan ölçümlerin güvenilirliği ve sonuçların doğruluğu ticaret, sağlık ve yasal düzenlemelerde büyük önem taşımaktadır. Ölçüm güvenilirliğinin sağlanması ve ölçüm sonuçlarının doğruluğunun temini için, ölçüm birimlerini tanımlayan, gerçekleştiren, muhafaza eden ve yaygınlaştıran metroloji faaliyetleri büyük önem arz etmektedir.

Metrolojinin tarihi eski uygarlıklara dayanmasına rağmen toplumdaki metroloji farkındalığı arzu edilen seviyede değildir. Bu kitap, ülkemizdeki bu farkındalığı artırmak amacıyla, geniş bir kitleye hitap edecek şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan bu kaynak; metrolojinin tarihçesi, faaliyet alanları, ulusal ve uluslararası yapılanmalar, temel metrolojik kavramlar gibi konuların yanı sıra ölçüm büyüklükleri ile ilgili ayrıntıları içermektedir.

Kitabın oluşturulmasında emeği geçen tüm TÜBİTAK UME personeline teşekkür ederiz.

Bir el kitabı niteliği taşıyabilecek bu kaynağı siz değerli okurlarımızın beğenisine saygılarımızla sunarız.

TÜBİTAK

Ulusal Metroloji Enstitüsü Müdürlüğü

1. METROLOJİ

1.1. METROLOJİYE GİRİŞ

Metroloji, kelime olarak Yunanca “METRON” kelimesinden türetilmiş olup, Türkçe karşılığı “Ölçüm Bilimi”dir. Metrolojinin amacı, bütün ölçme sistemlerinin temeli olan Uluslararası Birimler Sistemi (SI) ve SI’dan türetilen ölçüm birimlerini tanımlayarak bilim ve teknolojinin kullanımına sunmak ve yapılan bütün ölçümlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamaktır.

Metroloji üç ana faaliyeti kapsar [1]:

i. Uluslararası düzeyde kabul edilmiş ölçüm birimlerinin tanımının yapılması;

   Uzunluk ölçüm birimi olan metrenin tanımlanması buna bir örnektir.

ii. Ölçüm birimlerinin, bilimsel yöntemler kullanılarak laboratuvarlarda gerçekleştirilmesi;

   Uzunluk birimi metrenin lazer kullanılarak (yayılan ışınımın dalga boyu ile) elde edilmesi örnek olarak verilebilir.

iii. İzlenebilirlik zincirinin, bir ölçümün değeri ve doğruluğunun belirlenmesi, belgelenmesi ve bu bilginin yayılması ile kurulması;

   Örneğin, bir atölyede kullanılan kumpas ile birincil seviye uzunluk standardı arasındaki (kalibrasyon sertifikası ile) belgelendirilmiş ilişki.

Metroloji, ölçüm alanı ve belirsizliği ne olursa olsun ölçmenin tüm teorik ve pratik yönlerini kapsar. Günlük yaşantımızda, endüstride ve uluslararası ticarette anahtar rolü oynar. Doğru ve güvenilir ölçümler; çevre, sağlık ve güvenlik ile daha pek çok alanda kritik bir rol oynarken ürün kalitesinin temininde vazgeçilmez bir unsur olarak kendilerini gösterirler.

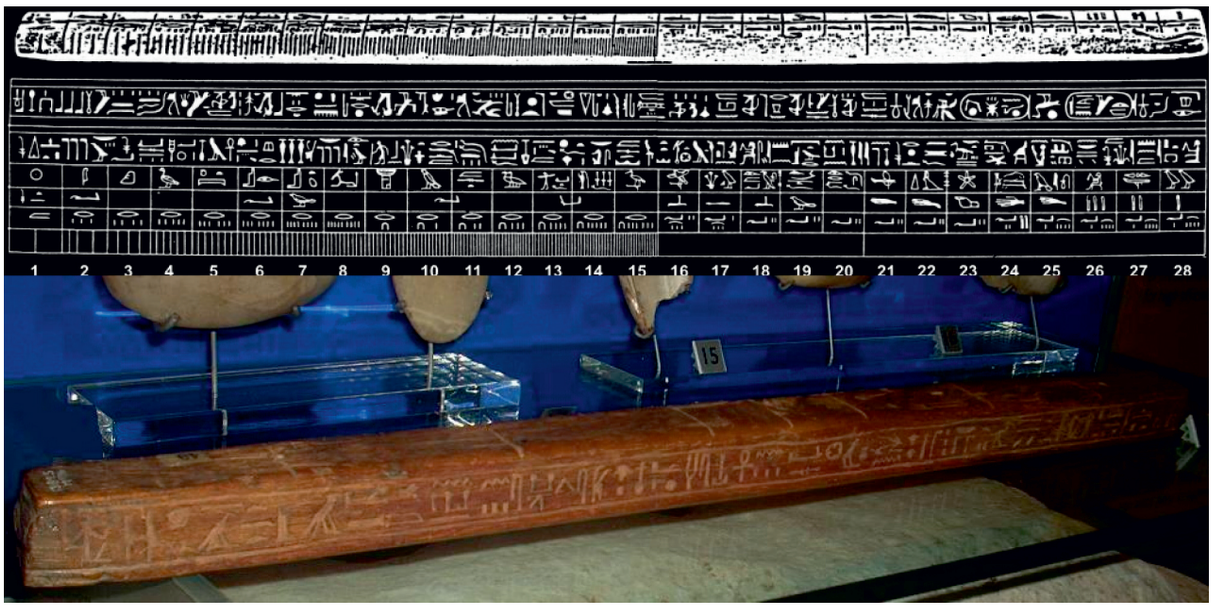
Metroloji faaliyetleri, temel olarak üç ana grup altında yürütülür:

i. Bilimsel metroloji: Ölçüm standartlarının oluşturulması, geliştirilmesi ve muhafazası ile ilgilenir.
ii. Endüstriyel metroloji: Sanayide ve üretimde yapılan ölçüm ve testleri güvence altına alır.
iii. Yasal metroloji: Ekonomik işlemlerin şeffaflığını etkileyen, tüketicinin korunmasına ve halk sağlığına yönelik ölçümlerle ilgilenir.

Bunların haricinde karşımıza çıkan temel metroloji kavramının uluslararası bir tanımı olmamasına karşın genellikle belli bir alanda en yüksek doğruluk seviyesini ifade eder. Bu nedenle, temel metroloji bilimsel metrolojinin en üst seviyedeki dalı olarak tanımlanabilir.

1.2. TARİHÇE

Eski Mısır’da, milattan önce (M.Ö.) 3000 yıllarında Firavunların piramitlerini ve tapınaklarını inşa etmekten sorumlu olan mimarları, her dolunayda, kullandıkları uzunluk standartlarını kalibre etmekle görevliydiler. Bu görevi unutan ya da ihmal edenler ölüm cezası ile karşılaşırlardı. İlk kraliyet uzunluk ölçü birimi olan Kübit (Cubit), tahttaki Firavun’un dirseğinden, elinin orta parmağının ucuna kadar olan mesafe olarak tanımlanmıştı (Şekil 1). Bu ilk ölçü, siyah granit üzerine kazınarak aktarılmış ve bu standart “Royal Cubit” olarak adlandırılmıştı. Oluşturulmuş olan birim standart, inşaat alanındaki işçilere aktarılmak üzere granit ya da tahta kopyalar olarak hazırlanmış ve kopyaları muhafaza etme görevi de mimarların sorumluluğuna verilmişti.



Şekil 1. Royal Cubit

Ölçümün önemi, kutsal kitaplarda da yer alır;

- “Hangi ölçüyle ölçerseniz aynı ölçü sizlere de uygulanacaktır “ (İncil Luka, 6:37).”
- “Ölçtüğünüzde ölçmeyi tam yapın, doğru terazi ile tartın. Bu daha hayırlı, sonuç bakımından daha güzeldir.” (Kur’an-ı Kerim, İsrâ Sûresi, 35. Ayet)

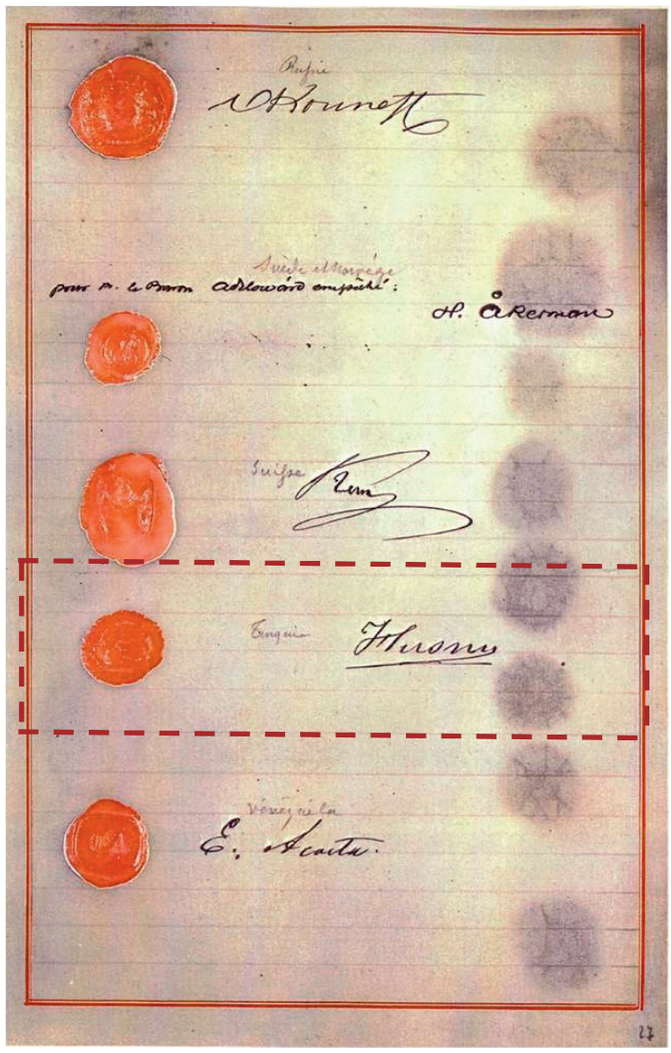
Tarihte, toplumlararası ilişkilerin artmasıyla birlikte özellikle ağırlık ve uzunluk birimlerini karşılaştıracak, bu konuda birliği sağlayacak bir ölçüm sistemine ihtiyaç duyuldu ve bilimsel bir yaklaşım aranmaya başlandı. Referans ağırlık olarak +4 °C’de 1 dm^3 suyun ağırlığı kabul edilerek metrik sistemin temelini oluşturan ilk doğal ve evrensel ifade şekli ortaya çıktı. 18. yüzyıl sonlarında, gelişen endüstriyle evrensel bir uzunluk standardının oluşturulması daha büyük bir önem kazandı. Mart 1790’da Paris’te toplanan “Bilimler Akademisi” (Académie des Sciences) tarafından oluşturulan ulusal komitenin, Dunkirk-Barselona üzerinden geçen meridyenin 1/40.000.000’unu yeni referans uzunluk olarak kabul etmesiyle uzunluk biriminin dünyanın özellikleri üzerinden türetilmesi gerekliliği gündeme geldi. Birimin adı Yunanca “METRON”dan alınan “METRE” olarak kabul edildi. 1793’te yapımına karar verilen “ilk metre prototipi” Paris’li mühendis Étienne Lenoir tarafından (25 x 40,5) mm kesite sahip pirinç çubuk olarak yapıldı. 1798’de Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) tarafından meridyen ölçümleri teyit edildi. Bugünkü Uluslararası Birimler Sisteminin (SI) öncüsü olan Ondalık Metrik Sistem, 22 Haziran 1799 tarihinde Paris’te, metre ve kilogramı temsil eden platin iki standardın oluşturulması ile kuruldu [2]. Platinden yapılmış kilogram ve metre standartları Fransa’nın ulusal arşivine törenle yerleştirilerek, bir kanunla “tanımlayıcı referans standart” olarak kabul edildi. Bu standartlar, arşivde saklandıkları için Arşiv Metre ve Arşiv Kilogram olarak anılırlar. 1837’de kabul edilen “Ölçüler ve Ağırlıklar Kanunu” ancak 1840’ta etkisini gösterdi ve uzunluk ölçüleri için metrenin tek geçerli birim olduğu açıklandı. Bundan sonra geçen 30 yıl içinde üretilen 25 adet metre prototipi bazı ülkelere de dağıtıldı.

Osmanlı döneminde metrik sisteme geçiş süreci, Sultan Abdülaziz döneminde, 1869 tarihli bir hatt-ı humayun ve kanunnameyle başladı. Bu kanunname ile uzunluk birimi olarak metre, ağırlık birimi olarak da gram kabul edildi. Ancak eski ölçülere uygun bir adlandırma kaygısıyla metre için “zira-ı a'şarî”, gram için ise “dirhem-i aşarî” deyimi kullanıldı. Sultan Abdülaziz ilk Ölçüler Kanunu’nun Mart 1870'den itibaren geçerli olacağı ve halkın Mart 1873’e kadar eski ve yeni birimleri birlikte kullanabileceği ancak bu tarihten sonra eski birimlerin bütünüyle yasaklanacağı

açıklamasına rağmen, kanun ancak II. Abdülhamit döneminde 1883 yılında uygulanmaya başlandı. Metrik ağırlıklara bu tarihten itibaren damga vurulmaya başlandı. Ancak 1895'te eski birimlere tekrar dönüldü.

19. yüzyılın ortalarında, özellikle dünya çapındaki ilk endüstriyel fuarlar sırasında, evrensel bir ölçüm sistemine olan ihtiyaç belirgin bir biçimde ortaya çıktı. 1875 yılında, Paris'te metre ile ilgili diplomatik bir konferans düzenlenerek, aralarında Osmanlı Devleti'nin de bulunduğu 17 devlet tarafından diplomatik bir antlaşma olan "Metre Konvansiyonu" imzalandı (Şekil 2).

Bu konferansta, Metre Konvansiyonu'na üye ülkelerin, nüfus ve o dönemki siyasi gücüne göre yıllık ödeme yapmasına karar verildi. Konferansta, Metre Konvansiyonu'nun kurucu devletleri arasında yer alan Osmanlı Devleti, Miralay Hüsnü Bey tarafından temsil edildi. Konvansiyon gereği ilk yıllık ödeme (27.132 Fransız Frangı) yapıldı. Ödenen miktar Amerika, Almanya ve Fransa'dan sonra yatırılan en yüksek dördüncü miktardı. Ancak, 1875 sonrası Balkanlar'da başlayan savaşlar ve Osmanlı - Rus Savaşı nedeniyle yıllık üyelik ödemeleri yapılamadı ve Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nun (BIPM) Genel Kurul üyesi olan Miralay Hüsnü Bey de kurul toplantılarına katılamadı. Yıllık ödemelerin yapılması ve genel kurul toplantılarına Miralay Hüsnü Bey'in katılması için, dönemin BIPM Başkanı G. Ibanez ve Genel Sekreteri A. Hirsch tarafından, Osmanlı Devleti'nin Paris Büyük Elçiliği'ne çeşitli tarihlerde yazılar yazıldı. Bu yazılar, arşivlerde yer alır.



Şekil 2. Metre Konvansiyonu belgesindeki Osmanlı Devleti adına Miralay Hüsnü Bey'in imzası

BIPM, 27 Şubat 1883 tarihli yazısında Miralay Hüsnü Bey'in, genel kurul toplantılarına katılmadığı için istifa etmiş sayılacağını ve yıllık ödemelerin yapılmamasından dolayı, üretilen ilk 30 prototip arasında yer alan ve Osmanlı Devleti'ne verilmesi gereken Ulusal Metre ve Ulusal Kilogram prototiplerinin verilemeyeceğini bildirdi. Bunun üzerine Osmanlı Devleti 1883'te Metre Konvansiyonu'ndan çekildiğini BIPM'e iletti. 1889 yılı Ekim ayında Birinci Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM) metre prototipi ve kütle birimi onaylanarak metrenin geçerliliği garanti altına alındı. Diğer taraftan BIPM, Osmanlı Devleti'nden bağımsızlığını kazanan bazı ülkelere de kilogram prototiplerini verdi. Örneğin, 1889'da 11 numaralı prototip Sırbistan'a, 1891'de de 2 numaralı prototip Romanya'ya verildi.

Türkiye'de metroloji, Osmanlı öncesi, Osmanlı dönemi ve günümüz Cumhuriyet dönemi olarak üç dönemde incelenebilir [3].



Şekil 3. Yazılı ilk standart niteliğini taşıyan Kanunname-i İhtisab-ı Bursa" fermanı

Osmanlı öncesi metroloji çalışmalarının İran ve Çin'le geliştirilen ticari ilişkiler sonucunda başladığı görülür. Divan-ı Lügati't Türk[4], günlük yaşamda kullanılan ölçü ve tartı birimlerinin saptanmasında bu dönem için en önemli kaynaktır**.** Bir yükün yarısı olan "artık", istif yığma ölçüsü "kırklım", hububat ölçüsü "sagu" ve arazi ölçümlerinde kullanılan yerel ölçü adları bu kaynakta yer alır. Bazı 14. yüzyıl kaynakları da İran-İlhanlı ağırlık birimi olarak kullanılan "lodra", "kantar", "okka" ve "batman"ın (menn), hububat ölçüsü olarak kullanılan "kile" ve "müdd"ün Osmanlı öncesi Anadolu'da ölçü sisteminin temelini oluşturduğunu belirtir. Selçuklu dönemi vakfiyelerinden, "ukiyye" (vukiyye), "irdeb", "mûd" ve "batman"ın Selçuklu dönemi ağırlık ve ölçüm sisteminin temel birimleri olduğunu öğreniyoruz. Selçuklu Dönemi'nde kullanılan bu ölçüm sistemi, Beylikler ve Osmanlı dönemindeki sistemlere de etkili bir şekilde yansımıştı. Batı Anadolu beyliklerinden Menteşe ve Aydınoğulları'nın, Bizans, Venedik ve Ceneviz ile geliştirdiği ticari ilişkiler, 14. yüzyılda Anadolu'da bazı Bizans ve İtalyan ölçülerinin de kullanılması sonucunu doğurdu. Örneğin İtalyan yarımadasında kullanılan ölçü birimi "rotolo" Batı Anadolu'da da geçerli bir ölçü birimiydi.

Osmanlı döneminde metrolojinin gelişimi, bölümün sonunda verilen "Metroloji: Geleneksel Ölçü ve Tartılardan Metre Sistemine" adlı makalede anlatılmaktadır [5].

Türkler, Anadolu toprakları üzerinde hükmetmeye başladıklarında, bugün de önemli olan alanlarda uygarlık örnekleri vermişlerdir. Standart konusu da bunlar arasındadır. Yaklaşık beş yüzyıl önce Bursa, Edirne, Sivas, Erzurum, Diyarbakır, Çankırı, Aydın, Mardin, Karahisar, Musul, Rize, Amasya, İçel, Arapkir, Karaman ve daha pek çok yerin mahalli özelliklerine ve üretim çeşitlerine göre standart kuralları konularak ciddi olarak uygulanmıştır.

1502'de Sultan II. Bayezid Han tarafından hazırlanan "Kanunname-i İhtisab-ı Bursa" fermanı bugünkü anlamda "Dünyanın Yazılı İlk Standardı" niteliğini taşıyor. Asıl metni İstanbul Topkapı Müzesi'nin Revan Kütüphanesi'nde bulunan bu ferman, tıpkıbasımı ve Türkçeleştirilmiş haliyle Türk Standardları Enstitüsü tarafından bir kültür hizmeti olarak 2003 yılında yayımlandı[6]**.**

Kalkınmanın temel taşlarından biri olan standardın öneminin yüzyıllar önce Türkler tarafından kavrandığını ifade eden bu belgede, bugünkü anlamda, ambalaj, kalite gibi esaslar ile narh ve ceza hükümlerine yer verilmiştir.

Metrik sisteme geçiş, ancak Cumhuriyet'in kurulmasından sonra 26 Mart 1931'de çıkartılan 1782 sayılı "Ölçüler Kanunu"yla sağlandı.

Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti Metre Konvansiyonu'na üye olmak için Mart 1933'de BIPM'e başvurarak ulusal prototip talebinde bulundu. Ancak BIPM tarafından Türkiye'ye yapılan, Pt-Ir alaşımından daha ucuz olan, nikelden yapılmış bir metre prototipi ile baros ya da monelden yapılacak bir kilogram prototipi verilmesi önerisi Türk Hükümeti tarafından kabul edilmedi. Bunun üzerine ilk 30 adet metre prototipi arasında yer alan 21 numaralı metre prototipi ve Pt-Ir alaşımından 42 numaralı kütle prototipi, 1935 yılında Türkiye'ye verildi. Ülkemizin bu ilk ulusal standartları Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'nca Türkiye İş Bankası Ulus Şubesi kasasında korumaya alındı. 1953 yılında, II. Uluslararası Kütle Prototiplerinin Karşılaştırma Ölçümleri'ne gönderilen 42 numaralı ulusal kütle prototipin, BIPM'de yapılan ilk muayenesi sonucunda, düşürülmüş olduğu tespit edildi. Söz konusu prototip yerine üretilen 54 numaralı kütle prototipi Türkiye'ye teslim edildi. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, Türkiye'de metroloji sisteminin önemi tekrar gündeme gelerek ve 21 Mayıs 1955'te "Ölçüler ve Ağırlıklar Kanunu" güncellendi. Kanunla kullanılması zorunlu ölçüm birimleri ve bunların yasal düzenlemeleri tanımlandı.

Ulusal prototipler, Türkiye'nin "Uluslararası Ölçüm Sistemi"ne entegrasyonunda, "arşından metreye", "okkadan kilograma" geçişe tanıklık etmelerinden dolayı, ayrıca tarihi bir öneme sahiptir. Ölçüm biliminin önemine ilişkin ülkemizdeki ilk yayınlardan biri, 1937 yılında Hüsamettin Yalhı tarafından kaleme alınan "Ölçüm Mevzuatı" isimli yayındır. Yayının önsözünde ülkemizde "Fizik Teknik Laboratuvarı" kurulmadıkça gelişmiş ülkelerin daima gerisinde olacağımızın belirtilmesi dikkat çekicidir[7].

Metrolojiyle ilgili en önemli teknik gelişme ise 1960'larda Türk Silahlı Kuvvetleri bünyesinde başlatıldı. Ölçüm doğruluğuna duyulan ihtiyaç doğrultusunda ülkemizde metroloji alanında faaliyet gösteren ilk laboratuvar Türk Silahlı Kuvvetleri bünyesinde 1962 yılında kuruldu.

1980'e kadar gerek Türk Silahlı Kuvvetleri'nin gerekse özel sektörün metroloji alanında ihtiyaçlarına yönelik yatırımlar yapılamadı. Başbakanlık, seksenli yılların başında "kamu ve özel sektörün ihtiyaçlarına topluca cevap verecek, birincil düzeyde ve ulusal ölçekte bir metroloji merkezi"nin kurulmasına karar vererek, fizibilite çalışmalarını yürütmek üzere Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nu (TÜBİTAK) görevlendirdi. İlk çalışmalara 1982'de başlandı[8]**.** Konuyla ilgili kişi ve kurumların fizibilite çalışmalarına onay vermesiyle ilk laboratuvarlar TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) bünyesinde Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi ismiyle kuruldu. Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi 11 Ocak 1992'de TÜBİTAK MAM bünyesinde enstitü statüsüne dönüştürülerek Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) adını aldı. UME yönetmeliğiyle ilgili yasa 8 Ocak 1998'de Resmi Gazete'de yayınlandı [9]. Bugün TÜBİTAK UME, ülkemizde "Yaşam kalitesinin ve ülkemizin rekabet gücünün artmasına katkıda bulunmak amacıyla ölçüm bilimi alanında araştırma geliştirme çalışmaları yaparak, ölçüm birliği ve güvenilirliğini sağlamak, bu doğrultuda uluslararası kabul gören referans ölçüm standartları ve teknikleri oluşturmak, geliştirmek, muhafaza etmek ve yaygınlaştırmak" misyonuyla çalışmalarını sürdürmektedir.

54 numaralı kütle prototipi Ulusal Kütle Skalası'nın oluşturulmasında kullanılmaktadır. 4 Temmuz 2007'de Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Standartlar ve Ölçüler Genel Müdürlüğü tarafından TÜBİTAK UME'ye teslim edilen ulusal metre prototipi ise 1981'den beri yalnızca tarihi bir değere sahiptir. Günümüzde uzunluk birimi metre, TÜBİTAK UME'de He-Ne lazerler kullanılarak, ışığın dalga boyu cinsinden nano düzeyde gerçekleştirilmektedir.

Metroloji: Geleneksel Ölçü ve Tartılardan Metre Sistemine

Feza Günergun

Osmanlı ölçü ve tartı sistemi Türk, İslam ve yerel metroloji geleneklerinin mirasçısıdır. İran ve Çin ile yoğun ticari ilişkilerin bir sonucu olarak, Orta Asya'da arşın ve batman üzerine kurulu bir ölçü sistemi vardı. 1074 veya 1077'de yazılmış olan Divanü Lugat it-Türk'de yer alan batman, kulaç, karış daha sonraları Osmanlılar tarafından kullanılmıştır. Selçuklu tartılarından okka ve dirhem de yeni değerler verilerek Osmanlılar tarafından kullanılmıştır. Bizans'daki litra veya ratl Rûmi (batman sisteminde 100 dirhem'den oluşan Osmanlı lidresi ile aynı) yaygın olarak kullanılmış olmakla birlikte, Osmanlıların yükselişinden önce Anadolu'daki ölçme sisteminin temelini İran-İlhanlı geleneği (batman - man) teşkil etmiştir. Kısaca, 14" yüzyılın ilk dönemlerine ait Selçuklu ve İtalyan kaynakları, Osmanlı sistemindeki temel terminolojiyi oluşturan batman, lidre, okka, kantar ve kile gibi terimlerin Osmanlı döneminden önce de Selçuklu Anadolusunda ölçüler için yaygın olarak kullanıldığını doğrulamaktadır. Osmanlı tartı sisteminin temel birimi haline gelen Osmanlı okkası (vukiyye) 400 dirheme eşitti.[1]

Mali işleri yürüten katipler için yazılmış olan 15. yüzyıl eserleri ve 16. yüzyıla ait resmi kayıtlar incelendiğinde, Osmanlı tartı sisteminin içinde iki farklı sistemin bulunduğu açıkça görülür: Bunlardan biri 176 dirheme (564,432 g) eşit olan lodra veya kantar lidresi'ne, diğeri de 100 dirheme (320,7 g) eşit olan lidre veya vezne lidresi'ne dayanmaktadır. Böylece, iki tartı dizisi oluşturulmuştur.[2]

1 batman =72 lidre = 7200 dirhem (23,090 kg)

1 kantar =100 lodra= 17600 dirhem (56,443 kg)

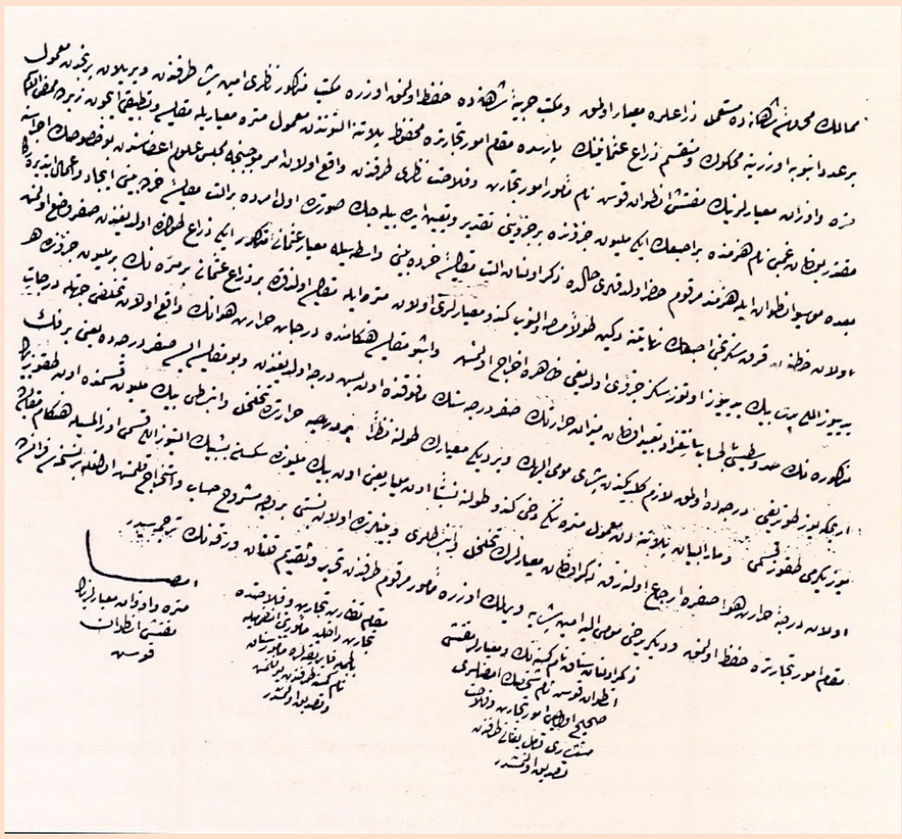
Tartılardaki bu iki sistem yanında, taksimatlandırmada onikili sistem geleneği mevcuttu. Osmanlılar, İslam ölçü ve tartılarıyla birlikte, İslam ölçü sisteminin onikili özelliğini de almışlardır. Onikili sistemde, 12 sayısının çarpanlarının yüksek sayıda olması (1,2,3,4,6,12) sebebiyle, elde edilen tam kesir sayısı da yüksek olmaktaydı ve bu durum ticari işlemlerde ve hesaplamalarda kolaylık sağlamaktaydı. Bu yüzden, 12'nin çarpanlarına ve katlarına dayanan bir sistem oluşturmuştu. (1 rıtl = 12 ukiyya, 1 ukiyya = 6 miskal, 1 kirat = 4 habba gibi). İmparatorluk bürokratları - Romalı, Bizanslı, Arap-Fars ve Osmanlı - tarafından geçekleştirilen bu sistem, yerel ölçü sistemleri ile de uygunluk içindeydi.[3]

Muhasebe ve aritmetik kitapları yanında 15.yüzyılın sonunda yayımlanan ve çarşıda satılan eşya fiyatlarını düzenleyen kanunlar, Osmanlı İmparatorluğu'nda kullanılan ölçü ve tartılar hakkında ayrıntılı bilgi içermektedir. Sırasıyla 1493 ve yaklaşık 1500 yıllarına ait iki muhasebe defterine göre, uzunluk ölçü birimi olarak zira, hacim için mudd-kile, ağır eşyaların tartılmasında kantar-lodra, hafif eşyaların tartılmasa için de miskal kullanılmaktaydı. 1500 yılı civarında Bursa, İstanbul ve Edirne piyasasındaki eşya fiyatlarını düzenleyen Osmanlı kanunnamelerine[4] göre, kile (tahıl, un ve tuz için hacim ölçüsü), arşın (uzunluk ölçüsü) ve dirhemin (ağırlık ölçüsü birimi) sürekli olarak muhtesib tarafından kontrol edilmesi gerekmekteydi. Ayrıca bu kanunnameler, kantar ve batman sistemlerinin kullanılmaya devam ettiğini göstermektedir.[5]

Standartlaştırma çabaları

Osmanlıların ölçü ve tartılar konusunda gösterdiği hoşgörü, onların herhangi bir alanı imparatorluk idaresine dahil etme süreci ile uyum içinde olmuştur. Osmanlılar, bir bölgede fetihten önce yerli halkın alışmış olduğu mevcut yasa ve gelenekleri muhafaza etme yolunda

bir politika izlemişlerdir. Bunarın kaldırılmasının ilgili bölgede sıkını ve zorluklar yaratacağına inanılmaktaydı. Genellikle yapılan tek değişiklik, fetihten önce var olan terminolojinin yerine Osmanlı terminolojisini koymaktan ibaretti. Bu da çoğunlukla uzun zaman alan bir süreçti ve bazı durumlarda tamamlanamadığı da olurdu. Bununla birlikte, vergilendirme ve idarenin ihtiyaçları Osmanlıları bazı bölgelerde ölçü ve tartıları standartlaştırma yönünde bazı reformlar yapmaya itmişti. Bu sebeple merkezi yönetim, tımar sistemindeki vergilendirmede İstanbul kilesi veya İstanbul okkası'nı standart ölçü olarak kullanmaya başladı. Ayrıca, ölçü ve tartılardaki birlik, sancak kanunnamesi ile de güvence altına alınmıştı. Ne var ki, çoğu durumda sancak içerisindeki bu standartlaştırma tipik bir yerel ölçünün bütün sancağa yaygınlaştırılması şeklinde uygulanmakta ve eşdeğerini de resmi standartlar oluşturmaktadır. Macaristan ve Bosna'da bu tür reformların yapıldığına dair belgeler mevcuttur. Bir hacim ölçüsü olan kile, Macaristan'da bir bölgeden diğerine büyük değişiklik gösterdiğinden, sultan, bir kilenin bütün eyalette 30 okka olmasını emretmişti. Bosna'da ise Osmanlı idaresi İstanbul kilesi olarak adlandırılan 20 okkalık kilenin uygulanmasını istememiş, bunun yerine Saraybosna'da kullanılmakta olan kileyi (64 okka) bölgenin standart kilesi olarak ilan etmiştir. Osmanlıların Macaristan ve Bosna'da yaptıkları standartlaştırma, ölçü ve tartılar konusundaki Osmanlı reformunun gerçek tabiatını ortaya koymaktadır. Burada amaçlanan, belirli bir bölge veya sancakta belirli koşullar altında bir birlik yaratmaktı. Muhtemel anlaşmazlıkları önlemek için bir bölgede tahıl ölçmek için kullanılacak kilenin ölçüsü belirlenmekte ve bu şekilde çiftçilerin komşu bir bölgedeki daha küçük birimler üzerinden vergi vermesi ihtimaline karşı tımar sahiplerinin payı garanti altına alınmaktaydı.[6]



Zira-i Osmani ile metrenin Paris'te 1841 yılında karşılaştırılması neticesinde hazırlanan Müfettiş Kutsch imzalı Fransızca raporun Türkçe tercümesi. Bu karşılaştırmada 1 zira-i Osmani, 0,757738 metreye eşit bulunmuştur. BOA, Mesail-i Mühimme No. 118[7]

Ölçü ve tartıların ayarının kontrolü ve bunların belli dönemlerde teftiş edilmesi, devletin en önemli görevlerinden biri olarak kabul edilmekteydi. İmparatorluğun başkenti İstanbul'da, şehir erzağının ulaştığı ve ana pazarların bulunduğu yer olan Unkapanı'ndaki ölçü ve tartıları sadrazam şahsen teftiş ederdi. Muhtesibin emrindeki kilerci ve tamgacı da sürekli olarak pazarda kullanılan her çeşit ölçünün ayarını kontrol ve tasdik etmekle görevliydi. Kilerci, hazinede saklanmakta olan standart ölçüleri kullanarak ayar işlemlerini yapar ve daha sonra da tamgacı bu ölçülerin üzerine resmi damgayı (miri tamga) basarak doğruluklarını ve geçerliliklerini onaylardı. Kileleri imal eden kutucular, yaptıkları bu ölçüleri ayar ve onay için kileci ile tamgacıya getirmek zorundaydı. Kasabalarda ve küçük şehirlerde kileci ile tamgacının işini muhtesib yapar ve kullanımda olan ölçü ve tartıların kontrolü için belirli aralıklarla pazarları gezerdi. Osmanlı idaresinin piyasadaki ölçü ve tartıları ayar etmek için ayarları vardı. Arazilerin dönüm olarak ölçülmesi için kullanılan iki ucu mühürlü ip, sultanın sarayındaki hazine bölümünde tutulurdu. III. Selim zamanında (1789-1807), abanoz ağacından yapılmış ve parmak ve hatt'lara bölünmüş standart arşun (arşın) İstanbul'da kurulan Mühendishane'de korunmaktaydı.[8]



Arazi ölçümlerinde kullanılan iki ucu damgalı ipin sarıldığı bronz ip tutamağı
16. yüzyıl. Garo Kürkman, Osmanlı Gümüş Famgaları, İstanbul 1996, s.16

1640 yılı civarındaki ekonomik krizi takiben, imparatorluk dahilindeki bütün ölçü ve tartıları standartlaştırma yolunda devrim niteliğinde bir plan teklif edilmiş ve tüm eyaletlerde kullanılan kile, arşın, vukiyye ve dirhem gibi ölçülerin İstanbul standartlarına göre ayarlanması önerilmişti. Tavsiye eden kişi ayrıca, "Nasıl ki sultanın [otoritesinin sembolü olan] hutbe ve sikke imparatorluğun her yerinde aynıysa, kile, arşın, vukiyye ve bütün diğer ölçülerin de İstanbul'dakilerin aynısı olması gerektiğini" eklemişti. Ne var ki, bu teklif uygulanmamıştır.[9] Metrolojideki standartlaşma teşebbüsleri yanında, 17. yüzyıla ait iki narh defteri [10], bu dönemde çeşitli eşyaların (dokuma, hasır, kaftan, gömlek, ayakkabı, tuğla vs.) belirli standartlara göre imal edildiğini göstermektedir.[11]

Zira-i mimari'nin standart ölçü olarak kabulü, top dökümünde karşılaşılan zorluklar neticesinde ortaya çıkmıştır. Top güllelerinin çapları teorik olarak hesaplanabilmekteyse de, Tophane-i Amire'de kullanılan ziralar farklı uzunlukta olduklarından topların imalinde istenilen hassasiyete ulaşmak mümkün olmamaktaydı. Bu sorunları çözmek için Mühendis Mehmed Emin Paşa 1840 yılında pirinçten bir "ortalama zira" imal ettirerek bunu 1841 yılında Paris'te metre ile mukayese ettirmiştir. Paris'teki ölçümde zira-i mimari'nin 0,757738 metreye eşit olduğu tesbit edilmiştir. Bu zira, daha sonra Sultan Abdülmecid'in iradesi ile Osmanlı Devleti'nin resmi uzunluk ölçüsü olarak kabul edilmiştir. Aynı yıl, standart okka da imal edilmiş

ve daha sonra ayar işlemlerinde kullanılmak üzere saklanmıştır. Zira'nın Paris'te tesbit edilen metrik karşılığı ile okkanın metrik karşılığı (1,282945 kg) Osmanlı Devleti'nin 1869'da yeni sistemi kabul etmesiyle birlikte hazırlanan çevirme cetvellerinde yer almıştır.[12]

Osmanlı ölçülerinin, metre sistemi öncesi Avrupa ölçüleriyle karşılaştırılması

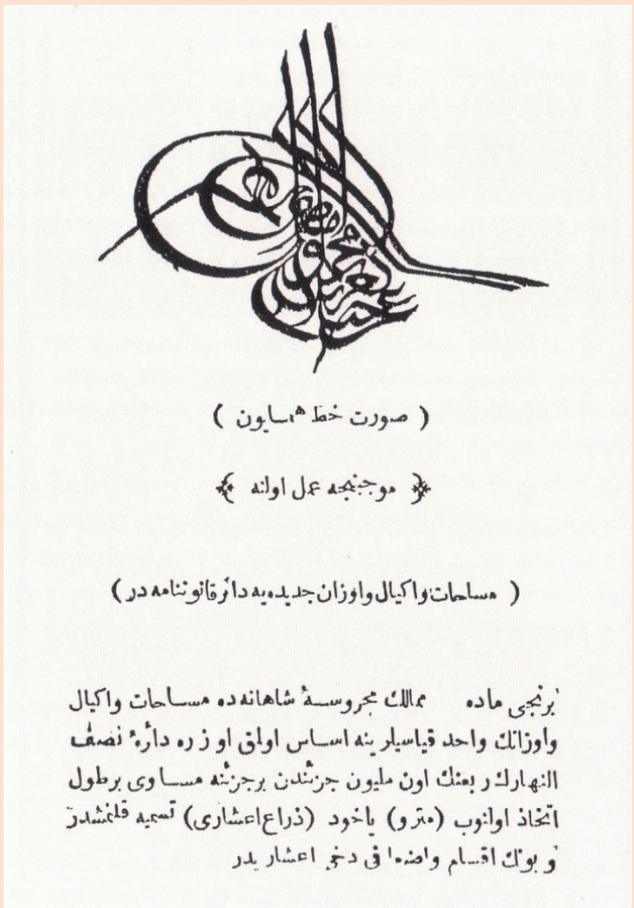
Avrupa bilim ve teknolojisini aktarma çabaları kaçınılmaz olarak 18. yüzyılın sonlarında Osmanlı ve Avrupa ölçülerini karşılaştırma ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Avrupa tekniklerinin Osmanlı İmparatorluğu'na girişine öncülük etmiş olan Mühendishane, metroloji sahasında da öncü rol üstlenmiştir. 18. yüzyılın sonlandaki siyasi durum, Fransız ve İngiliz uzmanların Mühendishane'de istihdam edilmesine yol açarken, bu dillerden tercüme edilen kitapların mühendislik eğitiminde kullanılması da Fransız ve İngiliz ölçülerinin Osmanlı ölçüleri cinsinden karşılıklarının belirlenmesini zorunlu kılmıştır. Yapılan karşılaştırmanın sonuçları Hüseyin Rıfkı Tamani'nin 1794'te yazdığı ve 1801'de basılan Telhis-ül Eşkal adlı eseri ile yine aynı yazarın Mecmuat ül-Mühendisin (İstanbul, 1805) adlı eserinde yayınlanmıştır. Fransız ve Osmanlı ölçüleri arasındaki oranın (6 usbu-i Osmani = 7 usbu-i françe) tesbit edilmesiyle çeşitli ülke ölçülerinin değerini Osmanlı ölçüleri cinsinden hesaplamak mümkün olmuştur, çünkü Fransız ölçüleri ile diğer Avrupa ülkelerinin ölçüleri arasındaki oranlar zaten bilinmekteydi.[13]

Osmanlı Devleti'ne metre sisteminin girişi

19. yüzyılın ortasından itibaren metrik ölçü ve tartılar Avrupa'daki bilim ve teknoloji kitaplarına girmeye başlamıştır. Bu tarihlerde, Osmanlı mühendisleri de Avrupa kaynaklarından derledikleri kitaplarda metreden bahsetmiş ve Osmanlı ölçü ve tartılarının metrik eşdeğerlerini hesaplamışlardır. Bu kitapların ilk örnekleri arasında, İshak Efendi'nin istihkam konusundaki kitabı Usul-i İstihkamat (İstanbul, 1834) ile İbrahim Ethem Paşa'nın Legendre'nin matematik kitabından tercüme ettiği Usul-i Hendese (Kahire, 1836) sayılabilir. Bu kitaplar ana hatlarıyla metre sistemini tarif etmekte ve Mühendishane-i Berri-i Humayun öğrencilerinin Avrupa tekniklerini uygulayabilmeleri için metrik ölçü ve tartıların Osmanlı ölçüleri cinsinden karşılıklarını vermektedir.[14] Metrik ölçü ve tartılar devlet tarafından imparatorluğun resmi ölçü ve tartı sistemi olarak kabul edilmeden önce de İstanbul hastahaneleri ile Mekteb-i Tıbbiye-i Şahane'deki doktor, kimyacı ve eczacılar tarafından kullanılmaktaydı. Ayrıca, resmi makamlara sunulmak üzere hazırlanmış bazı analiz raporlarında sonuçlar metre sistemi cinsinden verilmiş ve bunların Osmanlı ölçü ve tartıları cinsinden ifade edilmesine gerek görülmemişti. Kilogram, İstanbul, İzmir, Mersin, Antalya, Trabzon ve Samsun gibi limanlarda, özellikle de yurtdışı ile yapılan toptan ticarette kullanılmaktaydı. Metrik ölçüler, tütün ticaretiyle uğraşan Bafra ve diğer illerde genellikle La Regie du Tabac tarafından ve Bursa bölgesinde ipek alım-satımında da uygulanmaktaydı. Zonguldak havzasında ton ile kömür tartımı da yapılmaktaydı.[15]

Metre sisteminin Osmanlı Devleti tarafından resmen kabul edilmesi

Osmanlı Devleti'nin metre sistemini kabul etmesinde birçok faktör etkili olmuştur. Resmi belgelere göre, ülkenin farklı yerlerinde farklı ölçü ve tartılar kullanılması, değişik bölgelerde kullanılan ölçü birimlerinin farklı değerlere sahip olması ve bazı durumlarda aynı ağırlık birimlerinin değerlerinin tartılan malzemeye göre değişmesi ticarette bir takım güçlüklere sebep olmaktadır. Bu belgelerde ayrıca, Avrupa ülkeleriyle giderek artan ticaretin metre sisteminin kullanılmasını zorunlu hale getirdiği belirtilmiş ve yeni ölçü ve tartıların piyasada süregelen hileli satışlara ve sahtekârlıklara son vereceği düşünülmüştür. Osmanlı yöneticilerinin devleti ve toplumu modernleştirme heyecanının da, ondalık metre sisteminin kabulünde etkili olduğu söylenebilir.[16]



(صورت خط همایون)

﴿ موجبنجه عمل اولنه ﴾

(مساحات واکیال واوزان جدیده یه دائر قانوننامه در)

برنجی ماده ممالك محروسهٔ شاهانه ده مساحات واکیال
واوزانك واحد قیاسیلرینه اساس اولق اوزره دائرهٔ نصف
النهارك ربعنك اون ملیون جزئندن برجزئنه مساوی برطول
اتخاذ اولنوب (متر و) یاخود (ذراع اعشاری) تسمیه قلنمشدر
و بونك اقسام واضعاسی دخی اعشاری در

Mesahat ve Evzan ve Ekyal-i Cedideye Dair Kanunname'nin ilk sayfası

27 Eylül 1869 tarihli bu kanun ile desimal metre sistemi (usul-i aşari) Osmanlı Devleti'nin resmi ölçü ve tartı sistemi olarak kabul edilmiştir. Bu kanunda metre terimi, zira-i aşari olarak tercüme edilmiştir.

27 Eylül 1869 tarihinde çıkarılan Mesahat ve Evzan ve Ekyal-i Cedideye Dair Kanunname ile Osmanlı Devleti metre, gram ve litreyi resmi uzunluk, ağrılık ve hacim ölçüleri olarak kabul etmiştir. Kanun, Mart 1871'den itibaren devlet dairelerinde ve yerel yönetimlerde gerçekleştirilen bütün ticari işlemlerde yeni ölçü ve tartıların kullanılmasını, 1874'ten itibaren de metre sisteminin tüm Osmanlı topraklarında geçerli olmasını öngörmüştür.[17] Kanunun ilanından sonra, yeni sistemin kabulünü ve kullanılmasını kolaylaştırmak için bir dizi önlemler alınmıştır. Bunların en önemlisi, 1869 yılında yayımlanan Cedid Mikyasların Tatbik ve Muayenesine Dair Nizamname'dir. Bu yönetmelik, yeni ölçülerin uygulanması ve kontrolünden sorumlu kişilerin görevleri, metrik ölçü ve tartıların üretimi ile bunların vilayetlere dağıtılması yanında yeni ölçü ve tartıların damgalanması gibi konuları düzenlemektedir.[18] Yeni sistemin okullarda okutulması için de çalışmalar yapılmıştır. Maarif Nezareti metre sistemini tanıtan bir kitapçık hazırlatarak, okullarda okutulmasını zorunlu kılmıştır. Metre sisteminin ülkeye girişinde hazırlayıcı rol oynayan Evzan-ı Cedide Komisyonu vasıtasıyla Paris'ten yeni ölçü ve tartıları tanıtan levhalar ısmarlanmış ve bunlar ortaokullara gönderilmiştir. Çevirme cetvelleri basılarak dağıtılmış, yeni birimler için Osmanlıca terimler (örneğin metre için zira-i aşari) türetilmiş, Arap alfabesinin harfleri kullanılarak ölçü ve tartı birimlerini temsil edecek semboller tesbit edilmiştir. [19]



24 Eylül 1881 tarihli ölçüler kararnamesinin ilk sayfası

Bu kararnameyle, 1869'da metrik ölçü birimlerine verilen adlar yürükten kaldırılmış, metrik ölçülere geleneksel Osmanlı ölçülerinin adları verilmiştir: Metre için arşın, desimetre için kirah, santimetre için parmak terimleri kullanılmıştır. Geleneksel terminolojinin hem yeni, hem de eski ölçüler için kullanılması, metre sisteminin benimsenmesinde yeni güçlükler yaratmıştır.

Metre sisteminin ülke içinde yaygınlaşmasını ve halk tarafından kullanımını kolaylaştırmak amacıyla 1881 yılında bir kararname hazırlanmıştır.[20] 1869 kanunu ile karşılaştırıldığında, 1881 kararnamesi terminoloji ve çevirme cetvellerinin düzeni açısından radikal değişiklikler getirmiştir. Kararname, 1882'den itibaren geleneksel ölçü ve tartıların kullanımını yasaklamakta ve bunların tamamen imha edilmesi şartını getirmektedir. 1881 kararnamesinin öngördüğü bütün değişikliklere rağmen, metre sistemine geçiş 19. yüzyılın son yirmi yılı boyunca yeni yönetmelikler ve resmi duyurular vasıtasıyla belli aralıklarla ertelenmiştir. Bu ertelemelerin sebepleri arasında, halkın eski sisteme alışkanlığı ve dükkân sahiplerinin hileli davranışları gösterilmiştir.[21]

Kanunun 1869'daki ilanını takip eden altmış yıl boyunca (1869-1934) metre sisteminin halk arasında yaygın olarak kullanılmış olduğu ileri sürülemez. Bu süre boyunca esnaf her iki sistemin bir arada kullanımda olmasından çıkar sağlamaya çalışmış ve bu da halkta yeni sistemi kullanma konusunda bir isteksizlik yaratmıştır. Ancak, Avrupa ile iş yapan toptancı tüccarlar metre sisteminin kullanımına destek vermişler ve yeni sistemin kullanılmasına engel olduğu için esnafın hileli iş yapmasından şikayet etmişlerdir. Bununla birlikte, ülkenin diğer bölgelerine kıyasla İstanbul halkının yeni sisteme daha aşina olduğunu da kaydetmek gerekir.[22]

Çarşı ve pazarda kullanımı rağbet görmemiş olsa da, metre sisteminin 1871'den itibaren resmi işlemlerde kullanıldığına dair işaretler vardır. 20. yüzyılın ikinci on yılında hazırlanan çevirme cetvelleri buna bir örnektir. Bu dönemde, metre sistemi modern eğitim kurumlarında kullanılmakta ve muhtemelen ortaokullarda da öğretilmekteydi; zira matematik ders kitaplarında yeni ölçü ve tartıları tanıtan bolümler yer almıştır.[23]

Diğer taraftan, eczacılar örneğinde olduğu gibi, bazı meslek grupları da metre sisteminin yerleşmesine ve kullanılmasına katkıda bulunmuşlardır. Metre sisteminin Osmanlı eczanelerinde kullanımı, devletin bu ölçüleri resmen kabulünden önce tartışılmaya başlanmıştır. 1867 yılında, İstanbul'daki Mekteb-i Tıbbiye-i Şahane'deki bilim adamlarından oluşan bir komite, eczanelerde metrik ölçü ve tartıları kullanma zorunluluğunun üzerinde durmuştur. Bu yöndeki ilk adımlar 1872'de atılmış ve eczacıların metrik ölçü ve tartıları kullanması hususundaki kuralların içeren tamimler bütün eczanelere dağıtılmıştır. Buna ilave olarak, eczacılıkla ilgili uygulamalara dair kitaplara metre sistemi hakkında bilgiler dahil edilmiş ve Osmanlı ölçü ve tartılarının metrik değerleri verilmiştir. Ölçü ve tartılar meselesi Cemiyet-i Eczacıyan der Asitane-i Aliyye'de de tartışılmıştır. Hükümetin aldığı tedbirler yanında bir grup hekim ve eczacının gayretlerini takiben, metre sistemi Osmanlı eczanelerine girerek kısmen uygulanmaya başlanmıştır. 19. yüzyılın son dönemlerinde, eczanelerde Osmanlı ve metrik tartılar yanında Fransız ve bazen de İngiliz tartı birimlerinin kullanıldığı görülür. Bu çeşitlilik, temel olarak, özellikle İstanbul'da hekimlik yapan farklı milletlere mensup hekimlerin alışkın oldukları ölçü birimlerinde reçete yazmalarından kaynaklanmıştır.[24]

Son olarak, hem Fransa'da hem de Osmanlı Devleti'nde metre sisteminin kabulünde benzer zorluklarla karşılaşıldığını kaydetmek gerekir. Fransa'da yeni sisteme geçiş -ki neredeyse elli yıl almıştır- ölçü ve tartıların tekelini elinde bulunduran ayrıcalıklı toprak sahiplerine karşı bir tür devrim öncesi hareketle halk tarafından istenmişse de, ondalık metre sisteminin kabulü bir takım sebepler yüzünden gecikmiştir. Fransa'daki sebepler, Osmanlı'ya bu sistemin girişini geciktiren sebeplere çok benzerdir. Bunlar arasında, yeni sistemin ondalık karakteri, yeni terminoloji (Fransız ve Osmanlı halkının büyük kısmı deci-, deca- ve centi- ve uşr-, uşeyr- ve mişar- gibi önekleri karmaşık ve güç anlaşılır bulmuştur), fizyolojik engeller (entelektüel alışkanlıklar, değişime karşı olma vb) sayılabilir. İlave olarak, müşterilerini kolaylıkla aldatmalarına imkan sağladığı için, geçiş döneminin uzun olması dükkan sahiplerinin işine gelmiştir. Bu tür hilekârlıklar halk arasında yeni ölçü ve tartıların fazla rağbet görmemesine ve sonuçta da bu ölçülere karşı bir tepki doğmasına yol açmıştır. Osmanlı ve Fransız toplumları da dahil olmak üzere, birçok toplumda metre sisteminin astronomik temeli ve sosyal, fonksiyonel ve insani boyutlardan yoksun olması, bu sistemin kabulünü zorlaştıran unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır.[25]

Türkiye'ye metre sisteminin girişini resmileştiren 1869 yılındaki girişimin ve daha sonraki çalışmaların meyve vermesi için altmışı yılın geçmesi gerekmiş olsa da, bu teşebbüslerin tamamen başarısız olduğu söylenemez. 1869'da başlayan dönem bir alışma dönemi olmuş ve Cumhuriyet döneminde metre sisteminin tam olarak benimsenmesine zemin hazırlamıştır.[26] 1931 yılında çıkarılan Ölçü ve Tartılar Kanunu ile metrik ölçü ve tartıların kullanımı 1 Ocak 1933'ten itibaren zorunlu kılınmış ve 1 Ocak 1934'ten başlayarak yeni ölçülerin tüm Türkiye'de uygulanma sürecine girilmiştir. Bu kısa derlemeyi bitirmeden önce, Osmanlı ve Cumhuriyet yöneticilerinin metre sistemine bakış açısını burada belirtmek faydalı olacaktır. Gerek Osmanlı, gerekse Cumhuriyet yöneticilerinin metre sisteminin gerekliliğini savunurken ortaya koydukları gerekçeler hemen hemen aynıdır. Böyle olmakla birlikte, Osmanlı idarecileri metre sisteminin "Avrupa yeniliklerini benimsemede ve kullanmada" kolaylık sağlayacağını ifade ederken, Cumhuriyet idarecileri metrik ölçü ve tartıları kullanmanın Türk toplumunu "Avrupalı ve medeni" yapacağı görüşünü vurgulamışlardır.[27]

Kaynaklar:

1. H. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology", Turcica, sayı. 15 [1983], s. 312 - 318.
2. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.320.
3. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.322 - 23.
4. Ö. L. Barkan, "XV. Asrın Sonunda Bazı Büyük Şehirlerde Eşya ve Yiyecek Fiyatlarının Tesbit ve Teftişi Hususlarını Tanzim Eden Kanunlar", Türk Tarih Vesikaları, c. I, sayı: 5 (1942), s. 326-40; c. II, sayı: 7 (1942), s. 15 40; c. II, sayı : 9 (1942), s 168-77.
5. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.326.
6. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.329 - 33.
7. Bu belgeye dikkatimi çeken Dr. Mehmet Genç'e teşekkür borçluyum.
8. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology , s.335 - 36
9. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.336.
10. M. Kütükoğlu, "1009 (16000) Tarihli Narh Defterine Göre İstanbul'da Çeşitli Eşya ve Hizmet Fiyatları"', Tarih Enstitüsü Dergisi, sayı:9 (1978,), s. 1-85 ve Osmanlılarda Narh Müessesesi ve 1640 Tarihli Narh Defteri, İstanbul 1983.
11. F. Günergun, "Standardization in Ottoman Turkey", Introduction of Modern Science and Technology to Turkey and Japan, yay.haz. F. Günergun ve S. Kuriyama, Kyoto 1998, s. 205-12.
12. F. Günergun, "Osmanlı ölçü ve tartılarının eski Fransız ve metre sistemlerindeki eşdeğerleri; ilk karşılaştırmalar ve çevirme cetvelleri", Osmanlı Bilimi Araştırmaları II. İstanbul 1998, s. 36-40.
13. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.24 - 32.
14. İnalcık, "Introduction to Ottoman Metrology..., s.32 - 5.
15. F. Günergun, "L'Introduction du Systeme Metrique dans l'Etat Ottoman", Genese et Diffusion du Systeme Metrique, yay. haz. B. Garnier ve J-C. Hocquet, Caen 1990, s.180-81 ve "Introduction of the Metric System to the Ottoman State", Transfer of Modern Science ond Technology to the Muslim World, yay. haz. E. İhsanoğlu, İstanbul 1992, s. 299.
16. Günergun, "L'Introduction du Systeme ..., s. 179 ve "Introduction of the Metric..., s.297.
17. Mesahat ve Evzan ve Ekyal-i Cedideye Dair Kanunname (20 Cemaziyelahir 1286 / 27 Eylül 1869), Düstur (1. Tertip), c. 1, Dersaadet 1289/1872, s.744-46.
18. Cedid Mikyasların Tatbik ve Muayenesine Dair Nizamname, Düstur (1. Tertip), c. 1, Dersaadet 1289/1872, s.747 - 64.
19. Günergun, "L'Introduction du Systeme..., s. 181-83 ve "Introduction of the Metric..., s. 299-301.
20. Fi 29 şevval Sene 1298 ve Fi 11 Eylül Sene 1297 Tarihiyle Şeref Müteallik Buyrulan İrade-i Seniyye-i Hazret-i Padişahi Mucibince Yeni Ölçülerin Tanzim ve Tensikiyle Suver-i İcraiyesi Hakkında Kararnamedir. İstanbul, Matbaa-i Tophane-i Amire, 7 Rebiülevvel 1299/15 Kanun-i sani 1297 (27 Ocak 1882).
21. Günergun, "L'Introduction du Systeme..., s. 184-BG ve "Introduction of the Metric. .., s.302-4.
22. Günergun, "L'Introduction du Systeme..., s. ve "Introduction of the Metric..., s. 305-6.
23. Günergun, "Osmanlı ölçü ve tartılarının .., s. 40-3
24. F. Günergun, "Desimal Metrik Sistemin Osmanlı Eczahanelerine Girişi", Doğa Türk Eczacılık Dergisi, sayı 1 (1991), s. 55-66.
25. Günergur, "L'Introduction du Systeme..., s. 188-89 ve "Introduction of the Metric..., s. 307-8.
26. F. Günergun, "Du Zira au Metre: une Transformation Metrologique dans l'Empire Ottoman", Science ond Empires, yay. haz. Patrick Petitjean, C. Jami ve A. M. Moulin, Dordrecht-Boston-Londra 1992, s. 106-8.
27. F. Günergun, "Metric System in Turkey: Transition Period (1881- 1934)", Journal of the Japon-Netherlands Institute, Papers of the Third Conference on the Transfer of Science and Technology between Europe and Asia since Vasco da Gama (1498- 1998), yay. haz. W. G. J. Remmelink, Tokyo 1996, c. 6, s. 245-54.

2. METROLOJİ TERİMLERİ VE KAVRAMLARI

Doğru ve etkin bir anlaşılabilirlik için, dil birliğinin sağlanması, her alanda olduğu gibi metroloji alanında da önemli ve gereklidir. Bu husus dikkate alınarak, kamu kurumları, uluslararası kurumlar, ticari birlikler, akreditasyon kurumları, kanun düzenleyiciler ve profesyonel topluluklar için kaynak olması amacıyla, metrolojide kullanılan önemli temel kavramlar "Uluslararası Metroloji Sözlüğü - Temel ve Genel Kavramlar, İlgili Terimler (VIM)" [10], yasal metroloji ile ilgili kavramlar ise "Uluslararası Yasal Metroloji Terimleri Sözlüğü (VIML)"[11]" dokümanlarında tanımlanmıştır. Bu bölümde metroloji alanında sıklıkla kullanılan terim ve kavramların tanımları verilmektedir.

2.1. TEMEL TERİM VE KAVRAMLAR

Metroloji: Ölçüm bilimi ve uygulaması.

Ölçüm: Bir büyüklüğe atanabilecek bir veya daha fazla büyüklük değerinin deneysel olarak elde edilmesi süreci.

Büyüklük: Bir olgu, cisim veya maddeye ait olan ve miktarı sayı ve referans olarak ifade edilebilen özellik.

Temel Büyüklük: Bir büyüklükler sistemi altında yer alan ve birbirleriyle ifade edilemeyen büyüklükleri içeren alt gruplardan her birini ifade eden büyüklük. Temel büyüklükler birbirinden bağımsız büyüklüklerdir, çünkü bir temel büyüklük diğer temel büyüklüklerin üstel çarpımları ile ifade edilemezler.

Türetilmiş Büyüklük: Bir büyüklükler sisteminde, o sisteme ait temel büyüklükler ile tanımlanan büyüklük. Örneğin SI sisteminde kütlesel yoğunluk, kütlenin hacme (uzunluğun üçüncü kuvveti) oranı olarak tanımlanır.

Uluslararası Büyüklükler Sistemi: Yedi temel büyüklüğe dayanan büyüklükler sistemi: uzunluk, kütle, zaman, elektrik akımı, termodinamik sıcaklık, madde miktarı ve ışık şiddeti.

Ölçüm Birimi: Aynı türdeki iki büyüklüğün oranlarını bir sayı olarak ifade ederek bunların karşılaştırılmasını sağlayan, genel kabul ile tanımlanmış gerçek skaler büyüklük.

NOT 1: Ölçüm birimleri, genel kabul ile belirlenmiş isimler ve sembollerle gösterilirler.

NOT 2: Aynı büyüklük boyutuna sahip büyüklüklerin ölçüm birimleri, bu büyüklüklerin farklı türde olması durumunda dahi aynı isim ve sembolle gösterilebilirler. Örneğin farklı tür büyüklükler olmalarına rağmen hem ısı kapasitesi ölçüm birimi hem de entropi ölçüm birimi için, isim olarak Joule'ün Kelvin'e oranı ve sembol olarak J/K kullanılır. Ancak, bazı durumlarda özel ölçüm birim adlarının kullanımı, sadece belirli tür büyüklükler ile sınırlıdır. Örneğin 'saniyenin eksi birinci kuvveti' (1/s) ölçüm birimi frekans için kullanıldığında hertz (Hz), radyonüklid aktiviteleri için kullanıldığında bekerel (Bq) olarak adlandırılır.

NOT 3: Boyutu bir olan büyüklüklerin ölçüm birimleri sayıdır. Bazı durumlarda ise bu tip ölçüm birimleri; radyan, steradyan ve desibel gibi özel adlar ile veya mol başına milimol için 10^{-3} ve kilogram başına mikrogram için 10^{-9} gibi katsayılar ile ifade edilir.

NOT 4: "Birim" terimi, "kütle birimi" veya "kütlenin birimi" örneklerinde olduğu gibi sıklıkla bir büyüklüğün adı ile birleştirilerek kullanılır.

Temel Birim: Bir temel büyüklük için genel kabul ile belirlenmiş ölçüm birimi. Her bir temel büyüklük için sadece bir tane temel birim vardır. Örneğin, uzunluğun temel birimi SI sisteminde metre, CGS Sisteminde (Centimetre–Gram–Second System) ise santimetredir.

Türetilmiş Birim: Türetilmiş büyüklük için ölçüm birimi**.** Örneğin, m/s sembolü ile gösterilen saniyedeki metre ve cm/s sembolü ile gösterilen saniyedeki santimetre, SI'da, hız için türetilmiş birimlerdir.

Tümleşik Türetilmiş Birim: Herhangi bir büyüklükler sistemi ve belirli bir temel birimler kümesi için, temel birimlerin kuvvetlerinin çarpımları olarak gösterilen ve oran katsayısı bir olan türetilmiş birim.

Uluslararası Birimler Sistemi (SI): Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM) kabul edilen, temel birimlerin isimleri, sembolleri, bu isim ve sembollerin ön ekleri ile bunların kullanım kurallarını kapsayan Uluslararası Büyüklükler Sistemine dayalı birimler sistemi.

Ölçüm Prosedürü: Bir ölçüm modeli temeline dayanan ve bir ölçüm sonucu elde etmek için yapılan tüm hesaplamaları içeren ölçümün, bir ya da daha fazla ölçüm prensibine ve verilen ölçüm metoduna göre ayrıntılı tarifi.

Ölçüm Hatası: Ölçülen büyüklük değeri ile referans büyüklük değeri arasındaki fark.

NOT 1 : "Ölçüm hatası" kavramı iki durum için kullanılabilir:

a) Başvurulacak tek bir referans büyüklük değeri olması durumunda, öyle ki, bir ölçüm standardı kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon sonucu elde edilen ölçülen büyüklük değerinin ihmal edilebilir bir ölçüm belirsizliğine sahip olması veya kabul edilen bir büyüklük değerinin verilmesi halinde, ölçüm hatası bilinmektedir.

b) Ölçülenin, tek bir gerçek büyüklük değeri veya ihmal edilebilir bir aralık içerisinde gerçek büyüklük değerler kümesi ile ifade edildiği durumda ölçüm hatası bilinmemektedir.

NOT 2 : Ölçüm hatası, üretim hatası veya diğer kusurlar ile karıştırılmamalıdır.

Ölçüm Doğruluğu: Ölçülen büyüklük değeri ile ölçülenin gerçek büyüklük değeri arasındaki uyuşmanın yakınlığı. Ölçüm doğruluğu kavramı bir büyüklük değildir ve bir sayısal büyüklük değeri ile gösterilmez. Ölçüm hatası küçüldükçe, ölçümün daha doğru olduğu söylenilir.

Ölçüm Kesinliği: Belirli koşullar altında aynı veya benzer nesneler üzerinde tekrarlanan ölçümler ile elde edilen göstergeler veya ölçülen büyüklük değerleri arasındaki uyuşmanın yakınlığı.

Sistematik Ölçüm Hatası: Ölçüm hatasının tekrarlanan ölçümlerde sabit kalan veya tahmin edilebilir şekilde değişen bileşenidir.

Rastgele Ölçüm Hatası: Tekrarlanan ölçümlerde tahmin edilemez bir şekilde değişen ölçüm hatası bileşeni. Rastgele ölçüm hatası için referans büyüklük değeri, aynı ölçülen üzerinde sonsuz kere tekrarlanan ölçümlerin ortalamasıdır.

Ölçüm Tekrarlanabilirliği: Ölçümün tekrarlanabilirliği koşulları altında ölçüm kesinliği.

Ölçüm Belirsizliği: Elde edilen bilgiye dayanılarak ölçülene atfedilen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, negatif olmayan, istatistiksel yöntemlerle bulunan sayısal parametre.

NOT 1 : Ölçüm belirsizliği, düzeltmeler ve ölçüm standardına atanmış büyüklük değerleri gibi sistematik etkilerden kaynaklanan bileşenler ile tanımsal belirsizlik bileşenini içerir. Bazen öngörülen sistematik etkilerin düzeltilmesi yerine ilgili ölçüm belirsizliği bileşenleri dahil edilir.

NOT 2 : Parametre, örneğin, standart ölçüm belirsizliği olarak adlandırılan standart sapma (ya da onun belirli katları) veya belirli kapsam olasılığına sahip olan aralığın yarı genişliği olabilir.

NOT 3 : Ölçüm belirsizliği genel olarak birçok bileşeni içerir. Bu bileşenlerin bazıları, ölçüm serilerinden elde edilen büyüklük değerlerinin istatistiksel dağılımını kullanan A tipi ölçüm belirsizliği değerlendirmesi yöntemiyle belirlenir ve standart sapma ile nitelendirilir. B tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle belirlenen diğer bileşenler de, tecrübe ve diğer bilgilere dayalı olasılık yoğunluk fonksiyonlarından elde edilen standart sapma ile nitelendirilebilir.

A Tipi Ölçüm Belirsizliği Değerlendirmesi: Belirli ölçüm koşulları altında elde edilen ölçülen büyüklük değerlerinin istatistiksel analizi ile ölçüm belirsizliği bileşeninin değerlendirilmesi.

B Tipi Ölçüm Belirsizliği Değerlendirmesi : A tipi ölçüm belirsizliği değerlendirmesi dışında kalan yöntemler ile ölçüm belirsizliği bileşenlerinin değerlendirilmesi.

Standart Ölçüm Belirsizliği: Standart sapma ile ifade edilen ölçüm belirsizliği.

Bileşik Standart Ölçüm Belirsizliği: Bir ölçüm modelinin girdi büyüklükleriyle ilişkili bütün standart ölçüm belirsizliklerinin kullanımıyla elde edilen standart ölçüm belirsizliği.

Bağıl Standart Ölçüm Belirsizliği: Standart ölçüm belirsizliğinin ölçülen büyüklük değerinin mutlak değerine oranı.

Genişletilmiş Ölçüm Belirsizliği: Bileşik standart ölçüm belirsizliğinin birden büyük bir faktör ile çarpımı.

Kapsam Olasılığı (Güvenilirlik Seviyesi): Bir ölçülene ait gerçek büyüklük değerler kümesinin belirli bir kapsam aralığı içinde bulunma olasılığı.

Kapsam Faktörü: Genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin elde edilmesi için bileşik standart ölçüm belirsizliği ile çarpılan birden büyük bir sayı.

Belirsizlik Bütçesi: Ölçüm belirsizliğini, bileşenlerini, bunların hesaplanmasını ve kombinasyonlarını içeren beyan. Bir belirsizlik bütçesi, ölçüm modelini, bu modeldeki büyüklükler ile ilgili ölçüm belirsizliklerini ve tahmini değerlerini, kovaryansları, uygulanan olasılık yoğunluk fonksiyonlarının tipini, serbestlik derecelerini, ölçüm belirsizliği hesabının tipini ve kapsam faktörlerini içermelidir.

Model Fonksiyon: Değeri, bir ölçüm modelinin girdi büyüklüklerinin bilinen büyüklük değerleri kullanılarak hesaplandığında, ölçüm modelinin çıktı büyüklüğünün ölçülen büyüklük değeri olan büyüklüklerin fonksiyonu.

Kalibrasyon: Belirli koşullarda, ilk aşamada ölçüm standartları tarafından sağlanan büyüklük değerleri ve ölçüm belirsizlikleri ile bunlara karşılık gelen gösterge değerleri ve ilgili ölçüm belirsizlikleri arasında bir ilişkinin oluşturulduğu, ikinci aşamada ise bu bilginin ölçüm sonucunun göstergeden elde edilmesinde kullanıldığı işlemler dizisi.

NOT 1: Bir kalibrasyonu ifade etmek için, bir ibare, kalibrasyon fonksiyonu, kalibrasyon şeması, kalibrasyon eğrisi veya kalibrasyon tablosu kullanılabilir. Bazı durumlarda, kalibrasyon, göstergelerin toplamsal ya da çarpımsal bir düzeltmesi ve ilgili ölçüm belirsizliğinden ibaret olabilir.

NOT 2: Kalibrasyon, bazen hatalı olarak "dahili kalibrasyon" şeklinde adlandırılan ölçüm sisteminin ayarlanması ya da kalibrasyonun doğrulanması ifadeleri ile karıştırılmamalıdır.

NOT 3: Yukarıdaki tanımda tarif edilen ilk aşama sıklıkla tek başına kalibrasyon olarak algılanır.

Ayar (Ölçüm Sisteminin Ayarı): Ölçülecek bir büyüklüğe ait değerlerin önceden tanımlanmış gösterge değerlerine karşılık gelmesi için ölçüm sisteminde yapılan işlemler dizisi

NOT 1: Bir ölçüm sisteminin ayar çeşitleri; ölçüm sisteminin sıfır ayarı, kayma ayarı ve genişlik ayarını (bazen kazanç ayarı da denir) içerir.

NOT 2: Bir ölçüm sisteminin ayarı, ayar için gerekli bir ön şart olan kalibrasyon ile karıştırılmamalıdır.

NOT 3: Genellikle, ölçüm sistemi ayarlandıktan sonra kalibrasyon işlemi tekrarlanmalıdır.

Doğrulama : Bir öğenin belirtilen şartları sağladığını gösteren açık kanıtların elde edilmesi

ÖRNEK 1: Belirli bir ölçüm prosedürü ve büyüklük değeri için, bir referans malzemenin 10 mg'lık bir kütleye kadar homojen olduğu kabulünün teyidi.

ÖRNEK 2: Bir ölçüm sisteminin performans özelliklerini veya yasal gereklilikleri sağladığının teyidi.

ÖRNEK 3: Hedeflenen bir ölçüm belirsizliğine ulaşılabilirliğin teyidi.

NOT 1: Gerektiğinde ölçüm belirsizliğinin dikkate alınması gerekmektedir.

NOT 2: Tanımdaki öğe, bir işlem, ölçüm prosedürü, malzeme, bileşik, ölçüm sistemi, vb. olabilir.

NOT 3: Bir üreticinin beyan ettiği teknik özellikler, tanımda geçen belirtilen şartlara örnek olabilir.

NOT 4: VIML dokümanında tanımlandığı şekliyle yasal metrolojide doğrulama ve genel olarak uygunluk değerlendirmesi kapsamında doğrulama, bir ölçüm sisteminin muayenesini, işaretlenmesini ve/veya doğrulama sertifikasının verilmesini kapsar.

NOT 5: Doğrulama kalibrasyon ile karıştırılmamalıdır. Her bir doğrulama geçerli kılma değildir.

NOT 6: Kimya biliminde, madde miktarının doğrulanması, o maddenin kimyasal ya da yapısal özelliğinin tanımlanmasını gerektirir.

Geçerli Kılma: Belirtilen şartların amaçlanan kullanım için uygunluğunun doğrulanması.

ÖRNEK: Suda azotun kütle derişiminin ölçümü için oluşturulan ölçüm prosedürü, serumdaki ölçümlerde kullanılmak üzere geçerli kılınabilir.

İzlenebilirlik: Bir ölçüm sonucunun, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan belgelendirilmiş kesintisiz bir zincir aracılığı ile belirli bir referansa ilişkilendirilebilme özelliği.

NOT 1: Yukarıdaki tanımda geçen 'referans', bir ölçüm biriminin uygulamada gerçekleştirilmesi yoluyla tanımı, sıralı olmayan bir büyüklük için ölçüm birimi de dahil bir ölçüm prosedürü veya ölçüm standardı olabilir.

NOT 2: Metrolojik izlenebilirlik tanımlanmış bir kalibrasyon hiyerarşisi gerektirir.

NOT 3: Bir referansa ait özellikler belirtilirken, kalibrasyon hiyerarşisinin oluşturulmasında bu referansın kullanıldığı tarih ve kalibrasyon hiyerarşisi içinde ilk kalibrasyonun ne zaman yapıldığı gibi referans ile ilgili diğer metrolojik bilgiler verilmelidir.

NOT 4: Birden çok girdi büyüklüğü içeren bir ölçüm modelindeki ölçümler için, her bir girdi büyüklük değerinin kendi başına metrolojik olarak izlenebilir olması gerekir ve bu durumda kalibrasyon hiyerarşisi kollara ayrılabilir ya da bir ağ oluşturabilir. Her bir girdi büyüklük değerinin metrolojik izlenebilirliğini oluşturmak için gereken çaba, o girdi büyüklük değerinin nihai ölçüm sonucuna yapacağı katkıyla orantılı olmalıdır.

İzlenebilirlik Zinciri: Bir ölçüm sonucunu bir referansa ilişkilendirmede kullanılan, ölçüm standartları ve kalibrasyonların sıralaması.

Ölçüm Standardı (Etalon): Belirli bir büyüklük değeri ve ilgili ölçüm belirsizliği ile bir büyüklüğün referans olarak kullanılmak üzere tanımının gerçekleştirilmesi.

Uluslararası Ölçüm Standardı: Uluslararası bir anlaşma ile kabul edilmiş, yaygın olarak kullanılması amaçlanan ölçüm standardı. Örneğin, uluslararası kilogram prototipi.

Ulusal Ölçüm Standardı: Bir devlete veya ekonomiye hizmet amacıyla ulusal makamlarca kabul edilmiş, büyüklük değerlerinin ilgili büyüklük türüne ait diğer ölçüm standartlarına atanmasında temel olan ölçüm standardı.

Birincil Seviye Ölçüm Standardı: Bir birincil seviye referans ölçüm prosedürü kullanılarak ya da özel olarak üretilen bir nesnenin özelliklerine dayanarak, genel kabul ile belirlenmiş ölçüm standardı.

ÖRNEK 1 : Madde miktarı bilinen bir kimyasal bileşenin hacmi bilinen bir çözelti içinde çözülmesiyle hazırlanan, madde miktarı derişimine ilişkin birincil seviye ölçüm standardı.

ÖRNEK 2 : Kuvvet ve alanın ayrı ayrı ölçümlerine dayanan birincil seviye basınç ölçüm standardı.

ÖRNEK 3 : İzotop madde miktarı oranı ölçümleri için, madde miktarı bilinen belirli izotopların karıştırılmasıyla hazırlanan birincil seviye ölçüm standardı.

ÖRNEK 4 : Termodinamik sıcaklığın birincil seviye ölçüm standardı olarak suyun üçlü noktası hücresi.

ÖRNEK 5 : Özel olarak üretilmiş ve genel kabul ile belirlenmiş uluslararası kilogram prototipi.

İkincil Seviye Ölçüm Standardı: Aynı türdeki bir büyüklük için birincil seviye ölçüm standardı ile kalibre edilerek belirlenmiş olan ölçüm standardı.

NOT 1: Kalibrasyon doğrudan birincil ya da ikincil seviye ölçüm standardı kullanılarak yapılabilir ya da birincil seviye ölçüm standardı ile kalibre edilmiş ara ölçüm sistemi kullanılarak elde edilen ölçüm sonucunun ikincil seviye ölçüm standardına atanması ile yapılabilir.

NOT 2: Büyüklük değeri, birincil seviye referans ölçüm prosedürü ile belirlenen bir ölçüm standardı ikincil seviye ölçüm standardıdır.

Referans Ölçüm Standardı: Belirli bir kurum ya da mekanda bulunan belirli tür büyüklüklere ilişkin diğer ölçüm standartlarının kalibrasyonu için belirlenmiş ölçüm standardı.

Çalışma Ölçüm Standardı: Ölçüm cihazları veya ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu ya da doğrulanmasında rutin olarak kullanılan ölçüm standardı. Çalışma ölçüm standardı, genellikle referans ölçüm standardı**:** kullanılarak kalibre edilir.

NOT 1: Bir çalışma ölçüm standardı, genellikle referans ölçüm standardı kullanılarak kalibre edilir.

NOT 2: Doğrulamaya ilişkin olarak bazen "sağlama standardı" veya "kontrol standardı" terimleri de kullanılır.

Taşınabilir Ölçüm Standardı: Farklı yerler arasında nakledilmek üzere tasarlanmış, bazı durumlarda özel olarak imal edilen ölçüm standardı.

ÖRNEK: Batarya ile çalışan, taşınabilir Sezyum-133 frekans ölçüm standardı ve DC Gerilim Standardı

Transfer Ölçüm Cihazı: Ölçüm standartlarının karşılaştırılmasında aracı olarak kullanılan cihaz.

Ölçüm Standardının Muhafazası: Bir ölçüm standardının metrolojik özelliklerini belirli sınırlar içinde tutmak için gerekli işlemler serisi. Standardın muhafazası, genellikle önceden tanımlanmış metrolojik özelliklerin periyodik doğrulanmasını ya da kalibrasyonunu, uygun koşullarda saklanmasını ve özenli bir şekilde kullanımını içermektedir.

Referans Malzeme: Nominal özelliklerin ölçümü veya kontrolünde kullanım amacına uygun olarak oluşturulan, belirli özelliklere göre kararlı ve yeterince homojen malzeme.

Sertifikalı Referans Malzeme: Geçerli prosedürler kullanılarak ilgili belirsizlik değerleri ve izlenebilirlikleriyle beraber bir veya daha fazla belirli özellik değerlerini sağlayan ve yetkili bir kurum tarafından belgelendirilmiş referans malzeme.

2.2. YASAL METROLOJİ İLE İLGİLİ TERİM VE KAVRAMLAR

Yasal Metroloji: Yasal gereklerden kaynaklanan, ölçüleri, ölçü birimlerini, ölçü aletlerini, ölçü yöntemlerini ilgilendiren ve yetkili kuruluşlar tarafından yürütülen faaliyetler ile ilgili metroloji alanı.

Metroloji Güvencesi: Yasal metrolojide ölçüm sonuçlarının güvenilirliğinin sağlanabilmesi için gerekli her tür düzenleme, teknik araç ve gerekli işlemler.

Yasal Metrolojik Kontrol: Metroloji güvenliğine destek niteliğindeki her tür yasal metroloji faaliyeti. Yasal metrolojik kontrol, ölçü aletlerinin yasal kontrolü, metrolojik denetim ve metroloji bilirkişiliğini kapsar.

Ölçü Aletlerinin Yasal Kontrolü: Tip onayı, doğrulama vb. gibi ölçü aletleri ile ilgili yasal işlemlerin genel çerçevede belirlenmesi.

Metrolojik Denetim: Ölçü aletlerinin metroloji kanunları ve yönetmeliklerine uygun olarak kullanılmalarının kontrol edilmesi amacıyla gerçekleştirilen, ölçü aletlerinin üretimi, ithalatı, kurulumu, kullanımı, bakım ve onarımı üzerine yapılan kontrol.

Metroloji Bilirkişiliği: Mahkemede bir ölçü aletiyle ilgili olarak şahitlik yapmak ve yasal gereklere uygun olarak metrolojik özelliklerini belirlemek gibi her tür inceleme ve gösterim işlemi.

Tip (Model) Değerlendirmesi: Belgelenmiş gerekliliklere karşı, belirli bir ölçü tipi (modeline) aletine, bir veya daha fazla örneklerin sistematik muayene ve performans test sonuçlarının neticesinde tipi kabul edilebilir olup olmadığını belirlemek üzere değerlendirme raporu tutulur.

Tip Onayı: Değerlendirme raporuna dayanarak, ölçü aleti tipinin ilgili yasal gereklere ve belirli bir süre zarfında ilgili alanda güvenilir ölçüm sonuçları verecek şekilde kullanıma uygun olduğuna dair yasal karar.

Sınırlı Tip Onayı: Aşağıda belirtilen kısıtlamalar dahilinde ölçü aletinin tip onayı:

- Geçerlilik süresi,
- Onay kapsamındaki alet sayısı,
- Her aletin kurulum yerine ilişkin yetkili kurumlara bilgi verme yükümlülüğü,
- Aletin kullanımı.

Tip Onayının Tanınması: Belirli bir tarafca gönüllü olarak veya yeni bir tip onay sertifikası verilmeksizin ilgili yasal gereklere uygunluğu tanınan, başka bir tarafca tip onayının verilmesiyle yapılan iki veya çok taraflı bir anlaşmaya dayalı olarak alınan yasal karar.

Ölçü Aletinin Uygunluk Değerlendirmesi: Belirli bir aletin, bir alet takımının ya da alet üretim serisinin ilgili alet tipine uygun bütün yasal gerekleri yerine getirip getirmediğinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan test ve değerlendirme. Uygunluk değerlendirmesi metrolojik gereklerin yanı sıra güvenlik, elektromanyetik uygunluk, yazılım belirleme, kullanım kolaylığı, işaretleme gibi gerekleri de kapsar.

Ön Muayene: Kurulum yerinde doğrulaması tamamlanacak olan ölçü aletinin belirli bölümlerinin kısmi muayenesi ya da ölçü aletinin kurulmasından önce belirli bölümlerinin muayenesi.

Ölçü Aletinin Doğrulanması: Ölçü aletinin yasal gereklere uygunluğunu doğrulayan ve teyit eden doğrulama belgesinin muayenesini, işaretlenmesini ve/veya verilmesini kapsayan (tip onayı haricindeki) prosedür.

Doğrulamanın Tanınması: Bir tarafın gönüllü olarak veya iki ya da çok taraflı anlaşma temelinde, bir başka tarafca verilen doğrulama belgesinin ve/veya doğrulama işaretinin ilgili gereklere uygun olduğunun tanınmasına ilişkin aldığı yasal karar.

Ölçü Aletinin Denetlenmesi: Ölçü aletinin aşağıdakilerin tamamının veya bir bölümünün doğrulanması amacıyla muayene edilmesi:

- Doğrulama işareti ve/veya belgesinin geçerliliği,
- Damgalama işaretinin bozulmamış olması,
- Doğrulama sonrasında aletin hiçbir değişikliğe maruz kalmamış olması,
- Hatalarının kullanım süresi içinde izin verilen en büyük hatayı aşmaması.

Metroloji Kanunu: Yasal ölçü birimlerini tanımlayan, yasal metroloji program ve faaliyetlerinin örgütsel yapısını belirleyen kanun ve düzenlemeler.

Yasal Olarak Kontrol Edilen Ölçü Aleti: Önceden belirtilen gereklere, özellikle de yasal metrolojik şartlara uygun olan ölçü aleti.

Doğrulamaya Tabi Ölçü Aleti: Onaylanmış bir tipe ait olan veya ilgili teknik şartlara uygun olduğu için tip onayından muaf tutulabilecek ölçü aleti.

Onaylanmış Tip: Kullanım kararının tip onay belgesi ile tasdiklendiği, yasal kullanıma uygun olan belirli model veya gruba ait ölçü aletleri.

Yetkili Kuruluş: Ürünlere ilişkin mevzuat hazırlamaya ve yürütmeye yasal olarak yetkili bulunan ve Metroloji Kanunu hükümlerini kendi görev alanına giren ürünler itibariyle uygulayacak olan kamu kurum veya kuruluşu.

Uygunluk Değerlendirmesi: Ürünün, ilgili teknik düzenlemeye uygunluğunun test edilmesi, muayene edilmesi ve/veya belgelendirilmesine ilişkin her türlü faaliyet.

Uygunluk Değerlendirme Kuruluşu: Ürünün, ilgili teknik düzenlemeye uygunluğunun test edilmesi, muayene edilmesi ve/veya belgelendirilmesine ilişkin faaliyette bulunan özel veya kamu kuruluşu.

Onaylanmış Kuruluş: Test, muayene ve/veya belgelendirme kuruluşları arasından, bir veya birden fazla teknik düzenleme çerçevesinde uygunluk değerlendirme faaliyetinde bulunmak üzere, yetkili kuruluş tarafından belirlenerek, Metroloji Kanunu'nda ve ilgili teknik düzenlemede belirtilen esaslar çerçevesinde yetkilendirilen özel veya kamu kuruluşu,

Uygunluk İşareti: Bir ürünün, ilgili teknik düzenlemede yer alan gereklere uygun olduğunu ve ilgili tüm uygunluk değerlendirmesi işlemlerine tâbi tutulduğunu gösteren işaret.

Piyasa Gözetimi ve Denetimi: Yetkili kuruluşlar tarafından, ürünün piyasaya arzı veya dağıtımı aşamasında ya da ürün piyasada iken ilgili teknik düzenlemeye uygun olarak üretilip üretilmediğinin, güvenli olup olmadığının denetlenmesi veya denetlettirilmesi.

3. ULUSLARARASI METROLOJİ SİSTEMİ

3.1. BİLİMSEL METROLOJİ

Bilimsel metroloji, ölçüm büyüklükleri birim standartlarının tanımlanması, oluşturulması, muhafazası ve geliştirilmesi çalışmalarını kapsayan bir faaliyet alanıdır. Metre, kilogram, amper, saniye, kandela, mol, kelvin gibi temel ve bunlardan türetilmiş birimlerin standartlarının nesnel etkiler üzerinden tanımlanarak birincil düzeyde oluşturulması için yoğun araştırma geliştirme faaliyetleri içeren çalışmalardır. Birincil düzeyde oluşturulan standartlarla, metrolojinin diğer alanlarında faaliyet gösteren laboratuvarların uluslararası SI sistemine izlenebilirliği sağlanmakta, ulusal standartlar aracılığı ile ülkelerde yapılan ölçümlere referans oluşturulmaktadır.

Bilimsel metroloji faaliyetleri, ülkelerin ulusal metroloji enstitüleri tarafından yürütülür ve uluslararası düzeydeki faaliyetlerin koordinasyonu Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) tarafından sağlanır.

3.1.1 Metre Konvansiyonu ve Uluslararası Yapılanma

1875 yılında, Paris'te metre ile ilgili diplomatik bir konferans düzenlenmiş ve 17 devlet tarafından diplomatik bir antlaşma olan "Metre Konvansiyonu" imzalandı. İmza sahibi ülkeler, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) adında kalıcı ve bilimsel bir enstitünün kurulmasına ve parasal olarak desteklenmesine karar verdi. Metre Konvansiyonu'nda 1921 yılında küçük bir revizyon yapılmıştır.

Metre Konvansiyonu doğrultusunda bilimsel metrolojide oluşturulmuş düzen Şekil 4'de gösterilmiştir.

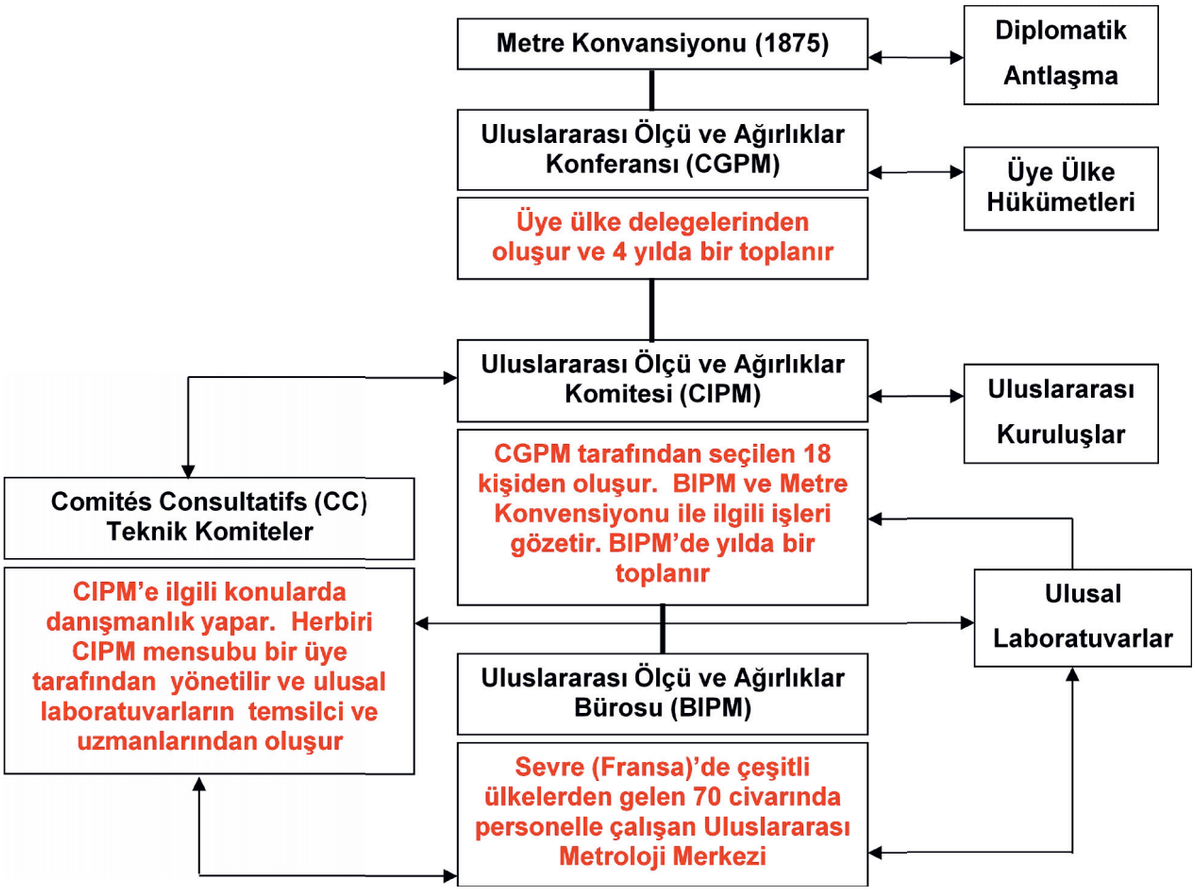
Üye devletlerin hükümet temsilcileri her dört yılda bir Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı (CGPM) için toplanır. CGPM, ulusal metroloji enstitüleri ve BIPM'in yaptıkları faaliyetleri tartışır gözden geçirir. Ayrıca BIPM'i ilgilendiren tüm önemli konular ve yeni temel metrolojik saptamalar üzerine önerilerde bulunur.

2012 yılı itibariyle Metre Konvansiyonu'na üye 56 ülke ve CGPM'ye gözlemci gönderme hakkına sahip 36 ülke ve ekonomi bulunmaktadır.

CGPM, her yıl toplanan Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) için en fazla 18 temsilciyi seçer. CIPM, BIPM'i CGPM adına yönetir ve uluslararası metroloji kuruluşları ile işbirliği yapar (Şekil 4). CIPM, CGPM tarafından verilecek teknik kararlar için ön hazırlıkları üstlenir. CIPM, 10 danışma komitesi tarafından desteklenir. Her danışma komitesinin başkanı genelde CIPM üyesidir. Danışma komitelerinin diğer üyeleri ise ulusal metroloji enstitülerinin temsilcileri ve teknik uzmanlardır. CIPM tarafından oluşturulan ve faaliyet gösteren teknik komiteler aşağıda listelenmiştir:

- Akustik, Ultrasonik ve Titreşim Danışmanlık Komitesi (CCAUV)
- Elektrik ve Manyetizma Danışmanlık Komitesi (CCEM)
- Uzunluk Danışmanlık Komitesi (CCL)
- Kütle ve Türetilmiş Birimler Danışmanlık Komitesi (CCM)
- Fotometri ve Radyometri Danışmanlık Komitesi (CCPR)
- Madde Miktarı Danışmanlık Komitesi (CCQM)
- İyonize Radyasyon Danışmanlık Komitesi (CCRI)
- Sıcaklık Danışmanlık Komitesi (CCT)
- Zaman ve Frekans Danışmanlık Komitesi (CCTF)
- Birimler Danışmanlık Komitesi (CCU)

Bu komitelerden her birisinde bir çok sayıda Çalışma Grubu (WG) faaliyet göstermektedir.



Şekil 4. Metre Konvansiyonu'na göre metrolojideki uluslararası yapılanma

3.1.2 BIPM

Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM), Metre Konvansiyonu'nun imzalanması ile kurulmuş olan, uluslararası metroloji faaliyetlerinde en önemli kuruluştur. BIPM, Paris yakınlarındaki Pavillon de Breteuil'de yerleşiktir. Bütçesi, Metre Konvansiyonu'na üye ülkeler tarafından ödenen aidatlardan oluşur. Kurumun stratejik amacı, ölçümlerde dünya çapında uyumluluğun sağlanmasıdır. Bu doğrultuda BIPM tarafından belirlenen eylemler aşağıda verilmiştir:

- Önemli fiziksel büyüklükler için temel standart ve ölçeklerin oluşturulması, uluslararası prototiplerin muhafazası,
- Ulusal ve uluslararası standartların karşılaştırmalarının düzenlenmesi,
- Temel fizik sabitlerin ölçümleri konusunda araştırma faaliyetlerinde koordinasyonun sağlanması.

3.1.3 Bölgesel Metroloji Organizasyonları

Bilimsel metroloji alanında faaliyet gösteren kurum ve kuruluşlar arasında etkin işbirliği ve koordinasyonun sağlanması için "Bölgesel Metroloji Organizasyonları" oluşturulmuştur. Bölgesel metroloji kuruluşlarının faaliyetleri, bölgeye özgü gereksinimlere odaklanmakla beraber, genel olarak aşağıdakileri kapsar [1]:

- Ulusal Ölçüm standartlarının karşılaştırmaları ve CIPM MRA'nın diğer faaliyetlerinin koordinasyonu,
- Metroloji alanında araştırma – geliştirme faaliyetlerinde işbirliği,
- Birinci seviyede oluşturulan SI birimlerine izlenebilirliğin sağlanması,
- Üye ülkelerin metroloji altyapılarının geliştirilmesi için işbirliği,
- Ortak eğitim ve danışmanlık faaliyetleri,
- Teknik imkan ve altyapının paylaşımı.

Günümüzde BIPM tarafından tanınan beş bölgesel metroloji organizasyonu bulunur:

- AFRIMETS
- APMP
- COOMET
- EURAMET
- SIM

Afrika kıtasındaki metroloji enstitülerinden oluşan Afrika Metroloji Sistemi (AFRIMETS) Mutabakat Zaptı'nın (MoU) imzalanmasıyla 2007 yılında kurulmuştur. AFRIMETS, kendi yapısına göre beş alt bölgesel organizasyondan oluşur: SADCMET/MEL, EAMET, CEMACMET, SOAMET ve MAGMET. Bölgedeki metroloji enstitülerinin büyük çoğunluğu gelişme aşamasında olduğundan, AFRIMETS kapsamındaki teknik komiteler, metroloji altyapısının geliştirilmesi, metroloji farkındalığının artırılması, ülke mevzuatlarındaki uyumlaştırma gibi konulara odaklanmıştır.

Asya Pasifik Metroloji Programı (APMP) olarak adlandırılan bölgesel metroloji organizasyonu 1977 yılından beri faaliyet gösterir. APMP, çalışmalarını 1997 yılında imzalanmış Mutabakat Zaptı çerçevesinde yürütür. APMP faaliyetleri 11 adet teknik komite ve "Malzeme Metrolojisi" disiplinler arası çalışma grubu tarafından yürütülmektedir.

Ağırlıklı olarak eski Sovyetler Birliği bünyesindeki ülkelerin metroloji enstitülerinden oluşan Ulusal Metroloji Enstitüleri Avrasya İşbirliği Organizasyonu (COOMET) 1991 yılında kurulmuştur. Kuruluş aşamasında, Orta ve Doğu Avrupa ülkeleri metroloji enstitüleri arasındaki işbirliğinin sağlanmasını hedeflemişti. İleriki dönemlerde Orta Avrupa ülkeleri metroloji enstitüleri başka bir bölgesel metroloji organizasyonuna (EURAMET) üye olmayı tercih edince, eski Sovyetler Birliği ülkeleri, Kuzey Kore, Küba gibi ülkelerin metroloji enstitüleri arasındaki işbirlikleri için şemsiye oluşturmuştur. COOMET faaliyetlerini halen tüm metroloji alanlarını kapsayan teknik komite ve bunların alt komitelerinde yürütür.

Avrupa'da metroloji çalışmaları 1987 yılında imzalanan Mutabakat Zaptı çerçevesinde, yaklaşık 20 yıl boyunca Avrupa Ölçüm Standartları Birliği (European Collaboration in Measurement Standards, EUROMET) tarafından koordine edilmekteydi. Avrupa metrolojisinde, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin entegrasyon ve koordinasyon düzeyinin artırma zorunluluğu Avrupa metrolojisinin koordinasyonu için yasal bir oluşum kurulması ihtiyacını ortaya çıkardı. 11 Ocak 2007 tarihinde Avrupa Metroloji Enstitüleri Birliği (EURAMET e.V.) Alman yasaları uyarınca kamu yararına çalışan birlik olarak kuruldu. EURAMET, Avrupa Bölgesel Metroloji Kuruluşu olarak 1 Temmuz 2007 tarihinde EUROMET'in yerini aldı. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, EURAMET'in kurucu üyeleri arasındadır.

Avrupa'daki ulusal metroloji enstitülerinin sayısı sınırlı olsa da, ülkelerdeki düzenlemeler gereği farklı alanlardaki ulusal standartların geliştirilmesi ve muhafazası için farklı kurumlar görevlendirilmiştir. Bu durumda, EURAMET çatısı altında 100'ün üzerinde ulusal metroloji enstitüsü ve araştırma kurumu toplanmıştır. Resmi olarak her ülke bir üye ile EURAMET'te temsil edilir.

Diğer bölgesel metroloji organizasyonlardan farklı olarak EURAMET, uluslararası karşılaştırmalar, izlenebilirliğin sağlanması gibi geleneksel metrolojik faaliyetler dışında ileri düzey araştırma-geliştirme çalışmalarına büyük önem verir. Bu bağlamda EURAMET tarafından yürütülen ve çok katılımlı büyük ölçekli araştırma projelerini içeren, Avrupa Metroloji Araştırma Programı (EMRP), EURAMET'i diğer bölgesel organizasyonların bir adım ileri gitmesini sağlar.

Amerika kıtalarındaki ulusal metroloji enstitülerden oluşan, Amerika Kıtaları Metroloji Sistemi (SIM) 1992 yılında kurulmuştur. Kuruluş aşamasında Kuzey ve Güney Amerika kıtalarındaki İspanyolca konuşan ulusal ülkelerin metroloji enstitüleri arasındaki işbirliklerini hedeflemişti. 1993 ve 1994 yıllarında gerçekleştirilen bir dizi etkinlik sırasında bölgesel ihtiyaçların gözden geçirilmesi sonucunda nihai organizasyonel yapısını oluşturmuştur. SIM, kendi yapısına göre beş alt bölgesel organizasyon olan NORAMET, CARIMET, CAMET, ANDIMET ve SURAMET'den oluşur.

3.1.4 Ulusal Metroloji Enstitüleri

Ulusal metroloji enstitüleri bir ya da daha fazla ölçüm büyüklüğü için, ulusal ölçüm standartlarını geliştirmek ve muhafaza etmek amacıyla ulusal karar ile görevlendirilmiş kuruluşlardır. Ülkelerdeki, farklı uygulamalara göre söz konusu ulusal karar, bazı durumlarda kanun, bazı durumlarda ise çeşitli yönetmeliklerde belirtilmiş olabilir. Bir ulusal metroloji enstitüsü, ülkesini uluslararası alanda, diğer ülkelerin ulusal metroloji enstitüleri, Bölgesel Metroloji Organizasyonları ve BIPM nezdinde temsil eder. Ulusal metroloji enstitüleri uluslararası metroloji organizasyonunun temel direğidir.

Bazı ulusal metroloji enstitüleri, bazı birimleri, diğer ulusal metroloji enstitülerine izlenebilir ikinci seviye standartlar kullanarak elde ederken, pek çok ulusal metroloji enstitüsü de metrolojide kullanılan temel ve türetilmiş birimleri, ulaşılabilir en yüksek uluslararası düzeyde, birinci seviyede gerçekleştirerek garanti altına alır.

Yukarıda tanımlanan faaliyetlere ek olarak, ulusal metroloji enstitüleri genellikle aşağıdaki faaliyetlerden de sorumludur:

- SI birimlerinin, akredite olmuş laboratuvarlara, endüstriye, akademiye, yetkili makamlara vs. kalibrasyon ile aktarımı,
- Metroloji alanında araştırma yapılması, yeni ve iyileştirilmiş ölçüm standartları (birincil ve ikincil) ve ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi,
- Uluslararası alanda üst seviye karşılaştırmalara katılım sağlanması,
- Ulusal kalibrasyon/izlenebilirlik hiyerarşisinin (Ulusal Ölçüm Sistemi) genel olarak gözlem altında tutulması.

3.1.5 Yetkilendirilmiş Enstitüler

Ulusal metroloji enstitüsü ya da bağlı olduğu devlet, uygun olduğu takdirde, belirli ulusal standartların muhafazası için ülke içindeki diğer kuruluşları görevlendirebilir. Bu laboratuvarlar, özellikle eğer CIPM MRA kapsamındaki faaliyetlere katılırlarsa, "Yetkilendirilmiş Enstitü" (Designated Institute – DI) olarak adlandırılır. Bazı ülkelerde, içinde tek ulusal metroloji enstitüsü bulunduran merkezi bir metroloji yapılanması mevcuttur. Diğer ülkelerde, lider bir ulusal metroloji enstitüsü ile ülke içinde ulusal görev alanlarına bağlı olarak, ulusal metroloji enstitüsü statüsünde olan veya olmayan çeşitli yetkilendirilmiş enstitülerden oluşan, merkezi olmayan bir yapılanma bulunur.

Yetkilendirilmiş enstitüler, ülkenin metroloji politikasına ve değişik konu alanlarındaki metrolojik faaliyet planına uyumlu olarak görevlendirilir. Kimya, tıp ve gıda gibi ticari olmayan alanlarda metrolojinin önemi arttıkça, bütün çalışma alanlarını kapsayan bir ulusal metroloji enstitüsüne

sahip ülke sayısı azalmakta ve böylece günümüzde yetkilendirilmiş enstitülerin sayısı da giderek artmaktadır.

3.1.6 Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi (MRA)

Uluslararası ticarette karşılaşılan teknik engellerin aşılmasında farklı ülkelerde gerçekleştirilen ölçümlerin eşdeğerliliği önemli rol oynar. İki farklı ülkede gerçekleştirilen ölçümlerin aynı anlam taşıması ve bu ülkelerde düzenlenen ölçüm raporları/kalibrasyon sertifikalarının karşılıklı tanınması için ilgili ölçüm dalında karşılaştırmanın yapılması şarttır. Karşılaştırma sırasında ülkelerin beyan ettiği sonuçlar arasındaki fark kabul edilebilir düzeyde olduğu takdirde, ülkeler bu ölçüm dalında düzenlenen belgeleri karşılıklı olarak tanırlar. Bu düzenleme dikkate alınırsa, her metroloji enstitüsünün uluslararası ticareti desteklemesi için her yıl içerisinde çok sayıda karşılaştırma yapması gerekir. Ancak yüksek sayıda karşılaştırmanın mali boyutu da oldukça yüksektir. Bu sorun, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi'ni (CIPM) yeni bir düzenleme yapmaya itmiştir. CGPM tarafından onaylanan bu düzenlemeye göre, metroloji enstitüleri arasında yapılacak bir uluslararası anlaşma ile uluslararası karşılaştırmaların belli bir program dahilinde yapılması, sonuçların CIPM ve onun oluşturduğu diğer organlar tarafından değerlendirilerek, sonuçlara göre ülkelerin birbirlerinin ölçümlerini tanıması ve kabul etmesinin sağlanması kararlaştırılmıştır. CIPM tarafından hazırlanan düzenleme 14 Ekim 1999'da Paris'te, aralarında TÜBİTAK UME'nin de bulunduğu 38 ülkenin metroloji enstitüleri tarafından imzalanmıştır. Günümüzde Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi'ne imza atmış ülkelerin sayısı 90'a ulaşmıştır.

Bir ulusal metroloji enstitüsünün düzenlediği sertifikaların diğer ulusal metroloji enstitüleri tarafından tanınması için, MRA gereği metroloji enstitüsünün belirli ölçüm alanında kendi yeteneklerini ispatlaması gerekir. Yeteneklerin ispatlanması için en uygun yöntem, katılım sağlanan karşılaştırmaların başarılı sonuçlarıdır. Bu nedenle, Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi'nin önemli bir parçasını anahtar ve destek karşılaştırmalar oluşturur. Bu karşılaştırmaların sonuçları herkese açık bir şekilde BIPM'in web sayfasında (www.bipm.org) yayınlanır.

MRA sisteminin en önemli unsurlarından biri de sistem içindeki her enstitünün ölçüm yeteneklerini gösteren tablolardır. Ulusal metroloji enstitülerinin ve yetkilendirilmiş enstitülerin kalibrasyon ve ölçüm yeteneklerini gösteren belge, Kalibrasyon ve Ölçüm Yetenekleri (CMC - Calibration and Measurement Capabilities) tablosu olarak adlandırılır. CMC verileri, ölçüm büyüklüğü, kalibrasyonu yapılan cihaz adı, ölçüm/kalibrasyon bölgesi, belirsizlik değeri, izlenebilirliğin hangi şekilde sağlandığı gibi temel bilgileri içerir. Belirli bir formata göre hazırlanan bu tablolar önce enstitünün içinde bulunduğu bölgesel organizasyonun diğer üyelerince değerlendirilir ve onaylanır. Daha sonra ise bu tablolar diğer bölgeler tarafından değerlendirilir. Ancak genel bir uzlaşmaya varılabilmesi için sık sık uluslararası toplantılar düzenlenmesi gerekir. Uzlaşma sağlanınca her ülkenin üzerinde uzlaşılmış kalibrasyon ve ölçüm yetenekleri CIPM tarafından yayınlanır. Bu şekilde bir enstitünün kalibrasyon ve ölçüm yetenekleri benzer olan diğer enstitülerce tanınır ve kabul edilir. Enstitülerin kabul edilmiş CMC tabloları BIPM veri tabanında Ek C'de verilir.

Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi'nin bir gereği de ulusal metroloji enstitü ve yetkilendirilmiş enstitüler tarafından sunulan hizmetlerin belirli standartların şartlarına uygun olarak kalite yönetim sistemi kapsamında olmasıdır. MRA, kalite yönetim sistemi standardı olarak ISO/IEC 17025 Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği için Genel Şartlar'a [12] öncelik tanımaktadır. Metroloji enstitüleri kalite yönetim sistemlerinin ISO/IEC 17025 standardına uygun olup olmadığının değerlendirmesi CMC tablolarının değerlendirilmesine benzer şekilde, bölgesel metroloji organizasyonlar tarafından yapılır.

3.2. ENDÜSTRİYEL METROLOJİ

Endüstriyel metroloji, yaşam kalitesini korumak ve akademik araştırmalarda kullanılmak üzere, sanayide, üretimde ve testlerde kullanılan ölçüm cihazlarının uygun şartlarda çalışmasını güvence altına almak için yapılan metrolojik faaliyetleri kapsar.

3.2.1 Kapsam Alanları

Bilimsel metrolojide yer alan, kütle, boyutsal, sıcaklık vb. gibi tüm alanlarda faaliyet gösteren endüstriyel metroloji, daha ziyade üretimde ve testlerde kullanılan ölçüm cihazlarına yönelik çalışmaları kapsamına alır. Üretim sırasında veya üretim hattında, ürüne özgü, özel ölçümleri gerçekleştiren tüm ölçüm cihazları bu kapsamda değerlendirilir.

3.2.2 İzlenebilirlik

Endüstriyel metroloji, bilimsel metroloji ile elde edilen temel ve türetilmiş birimlerin izlenebilirliğini endüstriyel üreticilere ve bilimsel çevrelere iletir. Düzenlenmemiş alan veya gönüllü alan olarak tabir edilen bölgede faaliyetlerini sürdürerek, kullanıcılara akredite edilmiş laboratuvarlar aracılığı ile izlenebilirliği ulaştırır.

3.2.3 Akreditasyon

Akreditasyon, başta laboratuvarlar olmak üzere uygunluk değerlendirme kuruluşlarının ulusal ve uluslararası kabul görmüş teknik kriterlere göre değerlendirilmesi, yeterliliğinin onaylanmasıdır.

Özel laboratuvarlar gibi kamu laboratuvarları da akredite olabilir. Akreditasyon gönüllülüğe bağlıdır, ancak bir çok uluslararası ve ulusal otorite, test ve kalibrasyon laboratuvarlarının kendi yeterlilik alanlarındaki kalitesini, bir akreditasyon kuruluşundan akreditasyonunu isteyerek güvence altına alır. Bazı ülkelerde, örneğin, gıda sektöründe çalışan laboratuvarlar veya perakende satış mağazalarında kullanılan tartıları kalibre eden laboratuvarlar için akreditasyon gerekliliktir.

Akreditasyon, laboratuvarın değerlendirilmesi ve düzenli gözetim denetimleri sonucu verilir. Akreditasyon, ISO/IEC 17025 “Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliği için Genel Şartlar” gibi ulusal ve uluslararası standartlara ve o laboratuvar ile ilgili teknik şartnamelere ve talimatlara dayanmaktadır.

3.2.4 Uluslararası Laboratuvarlar Akreditasyon Birliği (ILAC)

Uluslararası Laboratuvarlar Akreditasyon Birliği (ILAC), dünya çapında laboratuvar akreditasyon sistemleri arasındaki işbirliğini sağlayan uluslararası bir kuruluştur. 1977 yılında bir konferans olarak başlayan ILAC, 1996 yılında resmi bir kimliğe kavuşmuştur. 2000 yılında, ILAC’a üye 36 ülke tarafından ILAC MRA (Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi) imzalanmış ve 2008 yılı itibariyle ILAC MRA’nın üye sayısı 60’a yükselmiştir.

Katılımcı akreditasyon kurumların ILAC içinde değerlendirilmeleri sonucunda, test sonuçlarının uluslararası kabulü ve Dünya Ticaret Örgütü’nün “Ticarette Teknik Engellerin Ortadan Kaldırılması Anlaşması”nın tavsiye ettiği ve desteklediği şekilde ticaretteki teknik engellerin kaldırılması konularında iyileştirmeler sağlanmaktadır.

ILAC, laboratuvar akreditasyonu uygulamaları ve prosedürlerinin geliştirilmesi için dünyanın önde gelen uluslararası birliğidir. ILAC, laboratuvar akreditasyonunu, ticareti kolaylaştıran ve dünya üzerindeki yeterli donanıma sahip kalibrasyon ve test laboratuvarlarının tanınmasını sağlayan bir araç olarak teşvik eder. Küresel yaklaşımının bir parçası olarak ILAC, aynı zamanda kendi laboratuvar akreditasyon sistemlerini geliştirmekte olan ülkelere danışmanlık ve

destek verir. Gelişmekte olan bu ülkeler, ILAC'a gözlemci üye olarak katılabilirler ve böylece ILAC'a üye daha gelişmiş ülkelerin kaynaklarına erişim sağlayabilirler.

3.2.5 Bölgesel Akreditasyon Organizasyonları

ILAC çatısı altında yer alan akreditasyon organizasyonları coğrafi konuma göre bölgelere ayrılırlar. Bölgesel akreditasyon organizasyonları, ülkelerde yer alan ulusal akreditasyon organizasyonlarının ILAC'a bağlantısını sağlar.

Avrupa

Avrupa Akreditasyon Birliği (EA), Kasım 1997'de kurulmuş olan kar amacı gütmeyen bir kuruluştur ve Haziran 2000'de, Hollanda'da, bir dernek olarak tescil edilmiştir. EA, Avrupa Belgelendirme Akreditasyonu ve Avrupa Laboratuvar Akreditasyonu İşbirliği'nin birleşmesi sonucu oluşturulmuştur. EA, Avrupa coğrafyasında kurulu, ulusal temelde tanınan akreditasyon kurumlarının oluşturduğu bir ağdır. EA, bir bölgeyi temsilen, Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ve Uluslararası Akreditasyon Forumu'nun (IAF) bir üyesidir.

Gözetim değerlendirmesini başarıyla geçen EA üyeleri, aşağıdaki kurumların akreditasyonunu kapsayan çok taraflı anlaşmayı (Multilateral Agreement, MLA) imzalayabilirler:

- Laboratuvarlar (Kalibrasyon, Test ve Klinik),
- Muayene Kuruluşları,
- Belgelendirme Kuruluşları (Yönetim sistemi, ürün, personel).

Böylece, üyeler birbirlerinin sistemlerini ve akredite ettikleri uygunluk değerlendirme kuruluşları tarafından verilen sertifika ve raporların denkliğini tanırlar.

Haziran 2005'te, EA ve EUROMET, iki organizasyon arasındaki sürekli işbirliğini desteklemek amacı ile karşılıklı bir Mutabakat Zaptı (MoU) imzalamışlardır. Avrupa'nın bölgesel metroloji kuruluşu olarak EURAMET'in kurulmasını takiben, EA ve EURAMET arasında da bir Mutabakat Zaptı imzalanmıştır. Kalibrasyonla ilgili rehber dokümanların yönetimi EA tarafından EURAMET'e aktarılmıştır. Ayrıca EURAMET, kalibrasyonla ilgili laboratuvarlararası karşılaştırmaları konusunda EA'ya destek vermektedir.

Bir ülkenin metroloji altyapısı, ulusal metroloji enstitüsü, yetkilendirilmiş enstitüler ve akredite edilmiş laboratuvarları kapsar. Birçok Avrupa ülkesinin tercihi, ulusal metroloji enstitüsünün ve yetkilendirilmiş enstitülerin kalite yönetim sistemlerinin, akreditasyon, belgelendirme veya gözetim değerlendirmesi yoluyla üçüncü-taraf değerlendirmeye dahil olması yönündedir.

Amerika

Amerika Kıtası Akreditasyon İşbirliği (IAAC), Amerika kıtasındaki akreditasyon kurumları ve uygunluk değerlendirmesiyle ilgili diğer kuruluşların birliğidir.

Misyonu, Amerika kıtasındaki akreditasyon kurumları arasında uluslararası tanınırlığı olan karşılıklı tanıma anlaşmaları gerçekleştirmektir. IAAC ayrıca, ürünlerin, süreçlerin ve hizmetlerin iyileştirilmesine yönelik uygunluk değerlendirme yapısının geliştirilmesi hedefiyle, Amerika kıtasındaki akreditasyon kurumları ve ilgili taraflar arasındaki işbirliğinin gelişmesini teşvik eder. Hem laboratuvar hem de yönetim sistemleri akreditasyon kurumları IAAC üyesi olabilirler. IAAC, üyeleri için geniş kapsamlı eğitim programları sağlamaktadır.

Asya Pasifik

Asya Pasifik Laboratuvar Akreditasyon İşbirliği (APLAC), Asya Pasifik bölgesindeki kalibrasyon, test ve muayene kuruluşlarının akredite edilmesinden sorumlu kuruluşların birliğidir.

Üyeleri, ulusal olarak tanınan ve genellikle devlete ait veya devlet tarafından onaylanan akreditasyon kurumlarıdır. APLAC üyeleri, laboratuvarları ve muayene kuruluşlarını uluslararası standartlara göre denetler ve belirli test veya muayeneleri gerçekleştirme yetkinliklerini akredite eder.

APLAC, akreditasyon kurumları arasında bilgi paylaşımını sağlamak, prosedürleri uyumlaştırmak, akredite test ve muayene sonuçlarının ulusal sınırların ötesinde tanınmasını sağlamak amacıyla Karşılıklı Tanıma Anlaşmalarını geliştirmek için bir birlik olarak 1992 yılında kuruldu. APLAC aşağıda verilen konularda aktif olarak çalışır:

- Üyeler arası bilgi paylaşımı,
- Teknik rehber dokümanlarının geliştirilmesi,
- Laboratuvarlararası karşılaştırmalar / yeterlilik testleri,
- Laboratuvar denetçilerinin eğitimi,
- Karşılıklı Tanıma Anlaşmalarının uygulanması için prosedürlerin ve kuralların geliştirilmesi.

Afrika

Akreditasyon İşbirliği Kurumu (SADCA), Afrika bölgesinde uluslararası alanda kabul edilebilir akredite laboratuvarlar ve belgelendirme kuruluşlarının (kalite ve çevre yönetim sistemleri, personel, ürün) oluşturulmasına önayak olur ve hem gönüllü hem de zorunlu alanlarda ticarette teknik engellerin kaldırılması için akreditasyonu bir araç olarak üye ülkelere sunar. SADCA'nın görevi, üye ülkelerin kurumları için, kendi ülkeleri içindeki uluslararası tanınırlığı olan ulusal akreditasyon kuruluşlarının akreditasyon hizmetlerine erişim sağlayabilecekleri uygun bir akreditasyon altyapısı tanımlamak veya bölgesel bir akreditasyon kurumu (SADCAS) oluşturmaktır.

3.2.6 Ulusal Akreditasyon Kuruluşları

Ülkelerin akreditasyon sisteminden sorumlu olan organizasyonlara ulusal akreditasyon kuruluşu denir. Bu kuruluşlar bölgesel akreditasyon organizasyonları aracılığı ile ILAC'a bağlanırlar. Ulusal akreditasyon kuruluşlarına "TÜRKAK-Türkiye" , "UKAS-İngiltere" örneklerini verebiliriz.

3.2.7 Çok Taraflı Anlaşma (MLA)

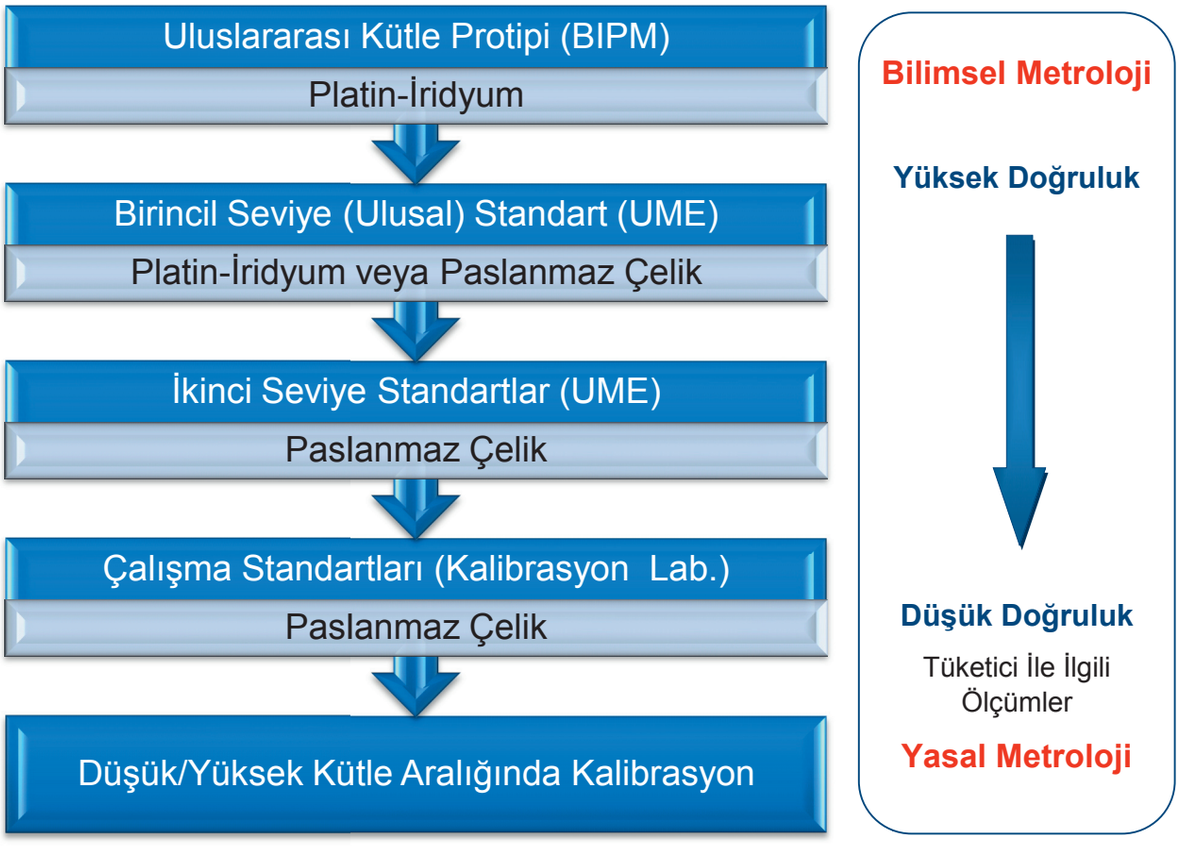
Akreditasyon aracılığıyla, herhangi bir birliğe üye ülkede, akredite olmuş laboratuvarlar tarafından yapılan test ve kalibrasyonların, tüm üye ülkelerdeki otoriteler ve endüstri tarafından kabul edilmesi amaçlanır. Bu sebeple, akreditasyon kurumları, akredite kuruluşlar tarafından verilen sertifika ve test raporlarını ve birbirlerinin sistemlerini tanıma ve denkliklerini kabul etmek için uluslararası ve bölgesel olarak kabul gören çok taraflı anlaşmalar imzalar. Bu anlaşmalara çok taraflı anlaşma anlamına gelen "Multilateral Agreements" (MLA) adı verilir. MLA'lar ulusal akreditasyon organizasyonları tarafından, alan bazında bölgesel akredite organizasyonları ile yapılır. Bölgesel organizasyon, global akreditasyon organizasyonu ile taraf anlaşması imzalamış ise, bu ulusal organizasyon bölge harici ülkelerde de tanınmış olur. Örneğin, TÜRKAK kalibrasyon alanında EA ile MLA imzalamıştır ve EA'nın ILAC ile aralarındaki anlaşması nedeniyle ILAC'a taraf olarak, dünya ülkeleri tarafından tanınmıştır.

3.3. YASAL METROLOJİ

Yasal metroloji, yasal gereklerden kaynaklanan ölçümleri, ölçüm birimlerini, ölçü aletlerini, ölçüm yöntemlerini kapsayan ve yetkili kuruluşlar tarafından yürütülen faaliyetlerle ilgilenen metroloji alanıdır [13].

Bilimsel metroloji ile yasal metroloji arasındaki farkı anlamanın en iyi yolu izlenebilirlik sürecini gözden geçirmektir. Genel süreç kesinlikle ölçüm bilimidir, fakat yasal metroloji ticarette ve yönetmeliklerde kullanılarak ölçümlerin güvenirliliğini ve kalitesini sağlar. Yasal metroloji izlenebilirlikle ilgilendiği kadar ölçüm cihazlarının hatalı kullanım riskleriyle ve yanlış kullanımının cihazlar üzerindeki etkileriyle de ilgilenir. Bir çok durumda kanunlar ve yönetmelikler, ulusal ve uluslararası şartnamelere bağlı ölçüm cihazlarının uygunluğuyla birlikte cihazın doğruluğunu da kontrol eder.

Örneğin, süpermarkette bulunan bir terazide yapılan kütle ölçümlerinin doğruluğu, terazinin ulusal metroloji enstitülerinde muhafaza edilen standart ağırlıklara karşı ulusal izlenebilirlik sistemi üzerinden kalibre edilmesiyle sağlanır. Ayrıca bu standart ağırlıklarda bir uluslararası standarda karşı kalibre edilir. Sonuç olarak süpermarkette yapılan ölçümlerin doğruluğu, uluslararasınca kabul görmüş bir kalibrasyon izlenebilirlik sistemi üzerinden sağlanmış olur ve böylece tüketici yerel ölçü ve ağırlıklar sisteminin doğruluğuna güvenir. Ölçümler doğrudan tüketiciyi etkilediğinden, yasal metroloji ölçüm odaklıyken, bilimsel metroloji, kalibrasyon ve ölçümün çeşitli zincirlerindeki bağlantılarda önemli bir rol oynar (Şekil 5). BIPM'de ve ulusal metroloji enstitülerinde çalışan uzmanlar, uluslararası birim sisteminde yer alan temel birimlerin ve türetilmiş birimlerin muhafazası ve tanımıyla ilgili çalışmalar yaptıklarından dolayı doğrudan yasal metrolojiyle uğraşmazlar. Buna karşın marketlerde ve alışveriş merkezlerinde bulunan terazilerin kalibrasyonlarıyla uğraşan kişiler ise yasal metrolojiyle doğrudan ilişkilidirler [14].



Şekil 5. Kütle için metrolojide ölçüm standartları hiyerarşisi

Yasal metroloji ticari alanlarla birlikte bireylerin ve toplumun korunmasında da uygulanır (kanunların uygulanması, sağlık ve asayiş ölçümleri gibi). Piyasadaki kuvvetler yeterince organize edilmediyse ya da yeterince uygun değilse, yasal metroloji özellikle gereklidir. Yasal metroloji, genellikle ölçüm cihazlarını, ölçüm sonuçlarını (hazır ambalajlama gibi) ve ölçüm birimleriyle ilgili kanuni hükümleri içerir. Söz konusu kanuni hükümler, ölçüm cihazları ve ölçüm sonuçlarıyla ilgili yasal zorunlulukları kapsar. Ayrıca bununla birlikte devlet tarafından veya devlet adına yasal kontroller de uygulanır.

Malların alışı, satışı, tartımı, ölçüm miktarını ve/veya ürünün kalitesini, hazır ambalajlı ürünlerin kütlesini, sayısını, hacmini ve ölçüm hizmetini içerir (zaman, mesafe gibi). Kanun düzenleyicileri sağlık, emniyet ve çevresel kanunları da düzenlemekle sorumludur. Kanunlar ve yönetmeliklerin sağlanmasında, piyasa gözetim denetimiyle ölçümlerin kontrol edilmesinde, alt yapının muhafazası ve geliştirilmesinde devletin rolü esastır.

Yasal metrolojinin uygulama alanında ölçüm sonuçlarını kullanan kişilerin metroloji uzmanı olmaları gerekmemektedir. Bu tür ölçümlerin güvenilirliği devletin sorumluluğundadır. Yasal olarak kontrol edilen cihazlar, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu aşağıda verilen durumlarda garanti etmelidir [1]:

- Çalışma şartlarında,
- Tüm kullanım süresi boyunca,
- Kabul edilebilir hata sınırları içerisinde.

Böylece ulusal veya bölgesel mevzuatlarda yasal metroloji, ölçüm cihazları ve paketleme öncesi ürünler de dahil olmak üzere ölçüm ve test yöntemleri için gerekli koşulları ortaya koyar.

Avrupa'da yasal olarak kontrol edilen ölçüm cihazlarının uyumlaştırılması halen 71/316/EEC Direktifine dayanmaktadır. 71/316/EEC Direktifi bütün kategorilerdeki ölçüm cihazları için yatay gereklilikleri ve ek olarak 1971'den beri yayınlanan ölçüm cihazlarının her bir kategorisini içeren diğer özel yönetmelikleri kapsar. Bu yönetmeliklere tabi olan üye devletler var olan ulusal mevzuatlarını feshetmek zorunda değillerdir. EC tip onayı alan (tüm cihazları kapsamamaktadır) ve EC ön doğrulaması yapılan ölçüm cihazları, daha fazla test veya tip onayı gerekmeksizin bütün üye ülkelerde piyasaya sürülebilir ve kullanılabilir. Tarihsel nedenlerden dolayı yasal metroloji kapsamı bütün ülkelerde aynı değildir. Otomatik Olmayan Tartım Cihazları (NAWI) Direktifinin 1 Ocak 1993'de ve Ölçüm Cihazları Direktifinin (MID) 30 Ekim 2006'da yürürlüğe girmesi ile ölçüm cihazları ile ilgili var olan birçok yönetmelik feshedilmiştir. Otomatik Olmayan Tartım Cihazları (NAWI) için Avrupa Birliği (AB) Direktifi, 90/384/EEC NAWI Direktifi (93/68/EEC Direktifi ile güncellenmiştir.) ticaretteki teknik engelleri kaldırır, böylece 'tek' pazar yaratarak cihazların kullanımını, ticari, yasal ve tıbbi amaçlar için ticari terazilerden endüstriyel kantarlara kadar düzenler.

2004/22/EC Ölçüm Cihazları Direktifi de ticaretteki teknik engelleri kaldırma işlemini devam ettirerek aşağıdaki ölçüm cihazlarının pazarlanmasını ve kullanımını düzenler:

- MI-001 su sayaçları,
- MI-002 gaz sayaçları,
- MI-003 elektrik sayaçları ve ölçüm trafosu,
- MI-004 ısı sayaçları,
- MI-005 su haricindeki diğer sıvılar için ölçüm sistemleri,
- MI-006 otomatik tartı cihazları,
- MI-007 taksimetreler,
- MI-008 maddi ölçütler,
- MI-009 boyutsal ölçüm sistemleri,
- MI-010 egzoz gazı analizörleri.

Üye ülkeler düzenlemeyi istedikleri cihaz tiplerine karar verme seçeneğine sahiptirler. Geçici hükümlere bağlı olarak var olan ulusal yönetmeliklerin yeni cihazlara uygulanması sona erdirilmiştir. Daha önceki direktiflerde elektronik cihazlar yer almazken, NAWI ve MID direktifleri bu cihazları da kapsar. Ülkemizde "Otomatik Olmayan Tartım Cihazları Yönetmeliği" 15 Nisan 2000 tarihinde, "2004/22/AT Ölçü Aletleri Yönetmeliği" ise 7 Ağustos 2008 tarihinde yürürlüğe girmiştir [15] [16].

3.3.1 Yasal Metrolojinin Kapsam Alanı

Yasal metroloji yönetmeliğinin kapsamı kullanıcı kategorisine bağlıdır. Hükümet, kullanıcıların korunmasına ve kullanıcıların yeteneklerini suistimal edenlere karşı korunmasına dikkat etmelidir. Sonuç olarak, yasal metrolojinin amacı, yasal yükümlülüklerle ölçüm sonuçlarında güvenirliği sağlamaktır. Yasal metrolojinin temel faaliyetleri;

- Yasal gereksinimleri düzenlemek,
- Denetim aktiviteleri, denetime tabi olan ürünlerin uygunluk değerlendirmesini ve kontrolünü yapmak,
- Denetime tabi olan ürünlerin ve aktivitelerin gözetimi ve denetimini yapmak.

Yasal metrolojinin kesin sınırları belli değildir ve kapsamı ülkeden ülkeye fark gösterebilir. Genel olarak yasal metrolojinin kapsamı, ticaret, çevre, sağlık ve güvenliktir.

3.3.2 Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu (OIML)

Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu (OIML), 12 Ekim 1955 tarihinde, Fransa'da, 24 ülke tarafından yasal metroloji prosedürlerinin küresel olarak uyumlu hale getirilmesi amacıyla devletlerarası bir antlaşma organizasyonu olarak kuruldu. OIML'in bünyesinde, 57 tam ve 62 gözlemci üye ülke bulunmaktadır [17] [18].

Bu organizasyonun amacı,

- Bilgi merkezini ve dokümantasyon sistemini oluşturmak,
- Farklı ülkelerde kullanılan ölçüm cihazları için yasal gereksinimleri içeren metinleri derlemek ve çevirmek,
- Yasal metrolojinin genel prensiplerini belirlemek,
- Ölçüm cihazları ve onların kullanımına yönelik model taslak kanunlar/yönetmelikler hazırlamak,
- Uluslararası otoritelerce tavsiye edilen cihazların kullanımı ve üye ülkeler tarafından onayı için cihazların uyumuyla ilgili gerekli standartları belirlemek,
- Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) ve diğer kurumlarla yakın ilişkiler kurmak.

Ülkemiz, OIML Organizasyonuna 1961 yılında gözlemci üye olarak katılmıştır. Avrupa Birliği teknik mevzuatı uyum çalışmaları sırasında OIML'ye tam üye olma ihtiyacının ortaya çıkması ile OIML'ye başvuru yapılmış, 6 Haziran 2005 tarihinde de OIML tarafından asil üyeliğimiz kabul edilmiştir. OIML bünyesinde bulunan 18 teknik komite ve alt komitelerine T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü tarafından 2011 yılı itibariyle katılım sağlanmaya başlanmıştır [19].

Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu (OIML) üç temel yapıdan oluşmaktadır,

- Uluslararası Yasal Metroloji Konferansı,
- Uluslararası Yasal Metroloji Komitesi,
- Uluslararası Yasal Metroloji Bürosu.

Paris'te bulunan Uluslararası Yasal Metroloji Bürosu (BIML), OIML'nin merkez ofisi ve sekretaryasıdır. Büro'nun görevleri;

- OIML'nin teknik komiteleri ve alt komiteleri tarafından üstlenilmiş teknik çalışmaları koordine etmek,
- OIML konferans ve toplantıları organize etmek ve organizasyonun mali işlerini yönetmek,
- OIML sertifikalandırma sistemini ve karşılıklı kabul düzenlemesini (MAA) muhafaza etmek,
- OIML tavsiyelerini, dokümanları, rehber dokümanları, uzman raporları, sözlükleri ve broşürleri yayınlamak ile OIML web sitesini düzenlemektir.

3.3.3 Yasal Metrolojiyle İrtibat Halinde Olan Organizasyonlar

OIML ile irtibat halinde olan uluslararası ve bölgesel organizasyonlar Şekil 6'da verilmiştir.

3.3.4 Karşılıklı Kabul Düzenlemesi

Karşılıklı Kabul Düzenlenmesinin (Mutual Acceptance Arrangement, MAA) amacı, OIML Sertifika Sistemini tanıtmak, sertifikanın güvenirliliğini artırmak ve dünya çapında çok taraflı, bölgesel ve ikili anlaşmaları sağlamaktır [20]. MAA altında, OIML Sertifika Sisteminde cihaz kategorisi için karşılıklı güven beyanı (Declaration of Mutual Confidence, DoMC) imzalanır. Bu beyanla, katılımcılar diğer katılımcılar tarafından verilen test sonuçlarıyla ilgili güveni beyan ederler. İki tür katılımcı vardır: Test raporlarını yayınlayan, bir başka ifadeyle yetkinliğini, tarafsızlığını ve kalitesini sağlayanlar ve bu koşullar altında test raporlarını yayınlamayanlar. Tüm katılımcılar, birinci katılımcı türünün yayınladığı test sonuçlarını kabul eder. MAA altında katılımcılar, OIML sertifikalarını ve test raporlarını düzenlerler. Çünkü bu şekilde katılımcıların tarafsızlığı, yetkinliği ve kalitesi, akreditasyonla veya eş düzey değerlendirme ile değerlendirilmiş olur.

DoMC'nin koşulları altında yayınlanan test raporları ve sertifikalar, BIML tarafından izin verilen belirli bir logo taşır. Çoğunlukla ülkeler katılımcıdır ya da en azından test sonuçları alıcısı olduğundan, OIML sertifikaları ve test raporları herhangi bir katılımcı tarafından yayınlanabilir ve çoğunlukla ülkeler tarafından kolayca kabul edilir. Üreticilerin tip değerlendirmeleri, DoMC'ye denk olan katılımcılar tarafından gerçekleştirilir. MAA'nin faaliyetleri BIML tarafından denetlenir.

Uluslararası Organizasyonlar	
	International Bureau of Weights and Measures (BIPM)
	International Organization for Standardization (ISO)
	International Electrotechnical Commission (IEC)
	International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)
	International Accreditation Forum (IAF)
	International Measurement Confederation (IMEKO)
	United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)
	World Trade Organization (WTO)

Bölgesel Organizasyonlar	
	Asia-Pacific Legal Metrology Forum (APLMF)
	The European Association of National Metrology Institutes (EURAMET)
	Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions (COOMET)
	Euro-Mediterranean Legal Metrology Forum (EMLMF)
	European Cooperation in Legal Metrology (WELMEC)
	Sistema Interamericano de Metrologia (SIM)
	Intra-Africa Metrology System (AFRIMETS)
	Southern African Development Community (SADCMET/SADCMEL)

Şekil 6. OIML ile irtibat halinde olan uluslararası, bölgesel ve diğer organizasyonlar

3.3.5 Piyasa Gözetimi ve Denetimi

Ürünlerin piyasaya ilgili mevzuatta belirtilen veya bir mevzuatın bulunmadığı durumlarda güvenliğe esas olacak diğer kriterlerle ortaya konulan (standartlar, iyi uygulama kodları, bilim ve teknoloji düzeyi, tüketicinin güvenliğe ilişkin makul beklentisi gibi) temel güvenlik gereklerini karşılar şekilde arz edilmesi, üreticinin, yetkili temsilcisinin ve/veya ithalatçının sorumluluğundadır. Üretici, yetkili temsilci ve ithalatçıların bu sorumluluklarını yerine getirip getirmediğinin denetimi ise kamu kuruluşlarınca ithalat, ürünlerin piyasa arzı aşamalarında veya ürünler piyasada iken gerçekleştirilir [21].

Ürünün piyasaya arzı ve dağıtımı aşamasında veya ürün piyasada iken ilgili teknik düzenlemeye uygun olarak üretilip üretilmediğinin, güvenli olup olmadığının denetlenmesi veya denetlettirilmesi anlamına gelen "piyasa gözetimi ve denetimi" (PGD) faaliyeti esas olarak aşağıdaki aşamalardan oluşur:

- İlgili kamu kuruluşu, denetimin gerçekleştirileceği firmaların, ürün gruplarının ve risk faktörlerinin öncelik verildiği bir stratejik planlama yapar,
- Yapılan plan çerçevesinde işaret, belge kontrolü gerçekleştirilir ve gerektiğinde numuneler alınır,
- Alınan numuneler laboratuvar analizine tabi tutulur,
- Denetim sonucunda güvensizliği tespit edilen ürünle ilgili olarak piyasaya arzın yasaklanması, piyasaya arz edilmiş ürünlerin toplanması, ürüne ilişkin güvensizliğin üretici tarafından giderilmesi, ürünün üretici tarafından güvenli hale getirilmemesi veya ürünün güvenli hale getirilmesinin imkânsız olduğu durumlarda, taşıdıkları risklere göre kısmen veya tamamen bertaraf edilmesine yönelik gerekli tedbirler alınır. Tüketicilerin sağlığının korunması amacına yönelik alınan bu tedbirlerin kamuoyuna duyurulması da PGD'nin görevidir.

Teknik Düzenlemeler ve Standart

Standart, resmiyeti tanınmış bir kuruluş tarafından yaygın olarak ve tekrar kullanılmak üzere kabul edilen, ürün veya ilgili işlem ve üretim yöntemleri için kurallar, rehberler ya da özellikler temin eden ve uyulması zorunlu olmayan belgedir. Ülkemizde standartlar yasa gereği yalnızca Türk Standardları Enstitüsü (TSE) tarafından hazırlanır. Teknik Düzenleme ise, idari hükümler de dahil olmak üzere, ürünlerin özelliklerini veya ürünlere dair işleme ve üretim yöntemlerini belirten ve uyulması zorunlu olan metindir. Devletler, piyasaya arz edilecek ürünlerin insan sağlığına, can ve mal güvenliğine, çevreye, hayvan ve bitki sağlığına, tüketici haklarına veya korunması amaçlanan benzeri temel değerlere zarar vermemesi ve tehlike oluşturmaması için gerekli önlemleri almakla yükümlüdürler. Bu yükümlülüğün yerine getirilmesi amacıyla, ülkemizdeki ilgili kurumlar, sorumlu oldukları ürünlere ilişkin teknik düzenlemeler yayımlar ve uygular. Teknik düzenlemelerin dış ticaret sistemine yansıtılması ise Ekonomi Bakanlığı tarafından gerçekleştirilir.

Teknik düzenlemelere uyum, ürünlerin yurtdışı pazarlara erişiminde hayati rol oynarken, tersi de ciddi teknik engeller yaratabilmektedir. Ülkelerin uyguladığı birbirinden farklı teknik düzenlemelerin dünya ticaretinde malların serbest dolaşımına engel teşkil etmemesi amacıyla ülkemizin de üyesi olduğu Dünya Ticaret Örgütü çerçevesinde "Ticarette Teknik Engeller Anlaşması" (The Agreement on Technical Barriers to Trade) hazırlanmıştır. Söz konusu anlaşma, teknik düzenlemelerin hazırlanması ve uygulanması aşamasında yerli ve yabancı ürünler arasında ayrım yapılmaması, teknik düzenlemelerin amaçlanan hedefe ulaşmak için gerekenden daha fazla ticareti kısıtlayıcı etkisi olmaması ve ülkelerin teknik düzenleme

taslaklarını diğer ülkelere önceden bildirmeleri yoluyla şeffaflık sağlanmasını temel ilkeler olarak belirlemektedir.

Öte yandan, ülkemiz ile Avrupa Birliği (AB) arasında tesis edilen Gümrük Birliği hükümleri, AB'nin ürünlere ilişkin teknik mevzuatının ve CE işareti, onaylanmış kuruluşlar, piyasa gözetimi ve denetimi, genel ürün güvenliği ve bildirimler gibi yatay kurallarının Türkiye tarafından uyumlaştırılmasını gerektirir. Söz konusu uyumlaştırma faaliyeti de, ülkemiz ile AB arasında malların serbest dolaşımının önündeki engelleri ortadan kaldırmayı hedefler. Bu doğrultuda, AB'nin teknik düzenlemelere ilişkin yatay kuralları, 2002 yılında yürürlüğe giren 4703 Sayılı Ürünlere İlişkin Teknik Mevzuatın Hazırlanması ve Uygulanmasına Dair Kanun ve bu Kanunun Uygulama Yönetmelikleri ile ulusal mevzuatımıza aktarılmıştır. AB'nin ürünlere ilişkin teknik düzenlemelerinin önemli bir bölümü ise ilgili Bakanlıklar tarafından uyumlaştırılmış olup, uyum faaliyetleri halen devam etmektedir.

Ülkemizde halihazırda 10 adet kuruluş tarafından PGD gerçekleştirilir. PGD kuruluşları arasında koordinasyon ise, sekretaryası ve başkanlığı Ekonomi Bakanlığı tarafından gerçekleştirilen Piyasa Gözetimi ve Denetimi Koordinasyon Kurulu tarafından sağlanır. Kurul, PGD konusunda yaşanan ortak sıkıntılara çözüm önerileri getirmek ve bağlı kuruluşların uygulamalarını tek tip hale getirmek açısından önemli bir iletişim ve işbirliği platformudur. Ekonomi Bakanlığı'nın PGD ile ilgili diğer görevleri ise PGD faaliyetlerini koordine etmek, ulusal PGD sistemi ile Türkiye ve AB arasında tehlikeli ürünlerle ilgili bildirimler konusundaki mevzuatı hazırlamak ve uygulanmasını takip etmek, ulusal PGD programları ile PGD yıllık raporlarını hazırlamak, ulusal PGD strateji belgesini hazırlamak ve takibini yürütmek şeklinde özetlenebilir.

Piyasa Gözetimi ve Denetimine İlişkin Yasal ve İdari Altyapı

1 Ocak 1996 tarihinde Türkiye ile Avrupa Birliği arasında Gümrük Birliğinin yürürlüğe girmesiyle birlikte, ülkemiz birçok alanda; AB mevzuatına uyum sağlanması ve uygulamaların da AB uygulamalarıyla paralel hale getirilmesine yönelik bazı yükümlülükler üstlenmiştir. Bu yükümlülüklerden biri de AB ve ülkemiz arasında ticarette teknik engellerin kaldırılabilmesi ve malların serbest dolaşımı ile piyasaya "güvenli" ürünlerin arzının sağlanabilmesi için, AB'nin ürünlere ilişkin teknik mevzuatına uyum sağlamaktır. Ülkemiz bu alanda mevzuat uyumunu büyük oranda gerçekleştirmiş olmakla birlikte çalışmalar halen devam etmektedir.

Ürünlere ilişkin teknik mevzuatın Avrupa Birliği mevzuatıyla uyumlaştırılması ile birlikte, uygulamada birliğin sağlanabilmesi ve tüketicilere güvenli ürünlerin ulaştırılabilmesi için, PGD sisteminin Avrupa Birliği'ndeki uygulamalara paralel şekilde güçlendirilmesine yönelik çalışmalara da devam edilmektedir.

Avrupa Birliği'nde "765/2008/AT sayılı Ürünlerin Pazarlanmasıyla İlgili Akreditasyon ve Piyasa Gözetimi ve Denetimi Gereklerini Belirleyen Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Konseyi Regülasyonu" ve "2001/95/AT sayılı Genel Ürün Güvenliği Direktifi" ile temel prensipleri belirlenen PGD, ülkemizde;

- 4703 sayılı Ürünlere İlişkin Teknik Mevzuatın Hazırlanması ve Uygulanmasına Dair Kanun,
- Bu kanuna istinaden 17 Ocak 2002 tarih ve 24643 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak, 11 Ocak 2002 tarihinde yürürlüğe giren "Ürünlerin Piyasa Gözetimi ve Denetimine Dair Yönetmelik",
- İlgili kamu kuruluşları tarafından yürürlüğe konulan ürüne özel mevzuat (Sağlık Bakanlığı tarafından yayımlanan Tıbbi Cihazlar Yönetmeliği ya da Denizcilik Müsteşarlığı tarafından yayımlanan Gemi Teçhizatı Yönetmeliği gibi),
- İlgili kamu kuruluşları tarafından yürürlüğe konulan idari düzenlemeler

çerçevesinde, 10 farklı kamu kuruluşu tarafından sorumlu oldukları ilgili ürün grupları itibariyle yürütülür.

Piyasa Gözetimi ve Denetiminin Koordinasyonu

İlgili kamu kuruluşlarınca sürdürülen PGD faaliyetlerinin koordinasyonu, "Ürünlerin Piyasa Gözetimi ve Denetimine Dair Yönetmelik"in 12'nci maddesine istinaden oluşturulan "Piyasa Gözetimi ve Denetimi Koordinasyon Kurulu" ile 06 Eylül 2011 tarihli ve 28046 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Başbakanlık Genelgesi ile kurulan "Piyasa Gözetimi, Denetimi ve Ürün Güvenliği Değerlendirme Kurulu" aracılığıyla sağlanır. Her iki kurulun da başkanlığı ve sekretaryası Ekonomi Bakanlığı tarafından yürütülür. Piyasa Gözetimi ve Denetimi Koordinasyon Kurulu'nda PGD kuruluşları Genel Müdür seviyesinde temsil edilir ve kurul kararları bu üyelerce alınır.

Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) ve Tüketici Dernekleri Federasyonu (TÜDEF) temsilcileri ile gündem konularıyla ilgisi bulunan, PGD kuruluşları dışındaki diğer kamu kuruluşlarının temsilcileri de Kurul'a gözlemci olarak katılabilir. Yılda en az 3 kez gerçekleştirilen Kurul toplantılarında, ülkemizde PGD alanında yaşanan sorunlar görüşülür ve çözüm önerileri geliştirilir. TOBB ve TÜDEF temsilcilerinin katılımıyla, konunun önemli tarafları olan üretici ve tüketici kesiminin ülkemizde PGD alanında yürütülen faaliyetler hakkında bilgi sahibi olması ve sürecin işleyişinde aktif şekilde yer almaları amaçlanır.

Piyasa Gözetimi, Denetimi ve Ürün Güvenliği Değerlendirme Kurulu yılda en az bir kere Ekonomi Bakanı koordinatörlüğünde toplanır. Kurulun amacı, ürün güvenliği sisteminin güçlendirilmesi için temel hedef ve stratejilerin belirlenmesidir.

Piyasa Gözetimi ve Denetiminin Önemi

Piyasadaki ürünlerin güvenli olup olmadığına yönelik denetimler ve bu denetimler neticesinde alınan önlemler ekonominin iki büyük aktörü olan üretici ve tüketici kesimini doğrudan etkilemektedir. Tüketiciler için sağlık ve güvenliklerine olumsuz etki edecek ürünlerin piyasada yer almaması önem arz ederken, üreticiler de kazançlarını ve ürünlerinin piyasadaki imajını göz önünde bulundururlar.

Piyasa gözetimi ve denetiminin insan sağlığını, can güvenliğini ve çevreyi koruyarak toplumun hayat kalitesini yükseltmenin yanı sıra, topluma, özellikle ekonomik anlamda sağladığı başka yararlar da vardır. Bunları özetlemek gerekirse:

- PGD, ürününü piyasaya güvenli arz etmek için gereken maliyete katlanmamış üreticilerin piyasadan dışlanmasını sağlayarak, mevzuata uygun ürün arz eden üreticinin karşılaştığı haksız rekabetin önüne geçer.
- Ülkemizin artan ithalat hacmi göz önünde bulundurulduğunda gümrüklerde bütün ürünlerin denetlenmesi imkanı bulunmaz. Bu anlamda PGD, ithalat denetimlerini tamamlayan ve ithal ve yerli bütün ürünlerin iç piyasada denetlenmesini sağlayan önemli bir araç olarak karşımıza çıkar.
- Piyasanın disipline edilmesine ve üretimin ileri standartlara kavuşmasına hizmet ederek, ihracatın rekabet gücünün artırılmasına da dolaylı olarak katkıda bulunur.

4. TÜRKİYE'DE METROLOJİ İLE İLGİLİ ORGANİZASYONLAR

Bir ülkenin kalite altyapısını metroloji, standardizasyon, akreditasyon ve uygunluk değerlendirmesi oluşturur. Toplumun refah düzeyinin yükseltilmesi, malların serbest dolaşımının sağlanması ve ticaretteki teknik engellerin kaldırılması için bu unsurlar gerekliliktir.



Şekil 7. Ülkelerin kalite alt yapıları için önemli unsurlar

Ülkemizde, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) bilimsel metroloji, Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü (MSGM) yasal metroloji, Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) akreditasyon ve Türk Standardları Enstitüsü (TSE) ise standardizasyon alanı için görevlendirilmiş kamu kurulumlarıdır.

	Bilimsel Metroloji	Yasal Metroloji	Akreditasyon	Standardizasyon
Türkiye	TÜBİTAK UME	MSGM	TÜRKAK	TSE
Bölge (Avrupa)	EURAMET	WELMEC	EA	CEN/CENELEC
Uluslararası	CGPM- BIPM	OIML	ILAC	ISO/IEC

Şekil 8. Metroloji ile ilgili organizasyonlar

Bu bölümde, ülkemizde bilimsel metrolojiden sorumlu olan TÜBİTAK UME, yasal metrolojiden sorumlu olan Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü, endüstriyel metroloji sisteminin içinde yer alan kalibrasyon ve test laboratuvarların akreditasyonu da dahil akreditasyondan sorumlu olan TÜRKAK ve standardizasyondan sorumlu TSE'ye dair bilgiler verilmektedir.

4.1. TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ (UME)

Ülkemizde bilimsel metrolojiden sorumlu olan UME'nin kurulmasına yönelik ilk çalışmalar, 1981 yılında, Başbakanlığın, kamu ve özel sektörün izlenebilirlik ihtiyaçlarına cevap vermek üzere, "birincil seviye ve ulusal ölçekte bir metroloji merkezi"nin kurulmasına karar vermesi ve fizibilite çalışmalarını yürütmek üzere Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nu (TÜBİTAK) görevlendirmesiyle başladı. TÜBİTAK tarafından hazırlanan fizibilite çalışmasının bütün ilgili kuruluşlar tarafından uygun bulunması üzerine, Başbakanlık bu Merkez'in kurulması görevini 14 Ocak 1982 tarihinde TÜBİTAK'a verdi.

10 Aralık 1984 tarihinde TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Enstitüsü bünyesinde Gebze'de birincil seviye bir "Endüstriyel Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı" kurulması hakkındaki Bakanlar Kurulu kararı Resmi Gazete'de yayınlandı. 1986 yılında bu laboratuvar "Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi" adını alarak, aynı yıl Ağustos ayında 226 m^2'lik kontrollü laboratuvar alanında faaliyetlerine başladı.

11 Ocak 1992 tarihinde, Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi, Marmara Araştırma Merkezi (MAM) bünyesinde enstitü statüsüne dönüştürülerek Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) adını aldı. Enstitü, 1 Ocak 1997 tarihinde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nden ayrılarak, doğrudan TÜBİTAK Başkanlığı'na bağlı bir enstitü statüsüne kavuştu.

TÜBİTAK UME'nin kuruluş ve işletilmesine ilişkin genel ilkeler, 17/7/1963 tarih ve 278 sayılı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Kurulması Hakkında Kanun'un 498 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ile yeniden düzenlenen 4. maddesi ve değişik 7. maddesi ile, 17.10.2001 tarih ve 24556 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanmış olan Çerçeve Yönetmelik'e dayanılarak çıkarılmış; "Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Ulusal Metroloji Enstitüsü Yönetmeliği" ile tanımlıdır.

Bugün TÜBİTAK UME, ülkemizin kalkınma hedefleri ve ekonomik gelişmeleri paralelinde, TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi'nde yer alan 10.443 m^2'si laboratuvar alanı olmak üzere 43.204 m^2 net alanlı bina kompleksi üzerinde faaliyet göstermektedir.

TÜBİTAK UME'nin misyonu, yaşam kalitesinin ve ülkemizin rekabet gücünün artmasına katkıda bulunmak amacıyla ölçüm birliği ve güvenilirliğini sağlamak, bu doğrultuda uluslararası kabul gören referans ölçüm standartları ve teknikleri oluşturmak, geliştirmek, muhafaza etmek ve yaygınlaştırmaktır.

Bu çerçevede TÜBİTAK UME'nin amacı,

i. Ulusal ölçüm standartlarını oluşturmak ve uluslararası izlenebilirliğini sağlamak,
ii. Ülkemizde yapılan ölçümleri güvence altına almak,
iii. Türkiye'nin bilimsel ve teknolojik gelişimine katkıda bulunmak,
iv. Ölçüm teknikleri, kalibrasyon yöntemleri ve temel metroloji alanlarında uluslararası düzeyde araştırma ve geliştirme çalışmalarına katılmak,
v. Yeni ölçüm teknikleri geliştirmek,
vi. Metroloji konusunda uluslararası kuruluşlar nezdinde Türkiye'yi temsil etmek,
vii. Türk endüstriyel ürünlerinin kalitesini artırmak için gerekli Ulusal Metroloji Sistemi'nin kurulmasına katkıda bulunmak,
viii. Uluslararası ticarette karşılaşılan teknik engellerin aşılmasında ülke endüstrisine yardımcı olmaktır.

a) Görev ve Sorumlulukları

TÜBİTAK UME'nin yönetmeliklerle tanımlanan görevleri aşağıda özetlenmiştir:

i. Türkiye'de kullanılan temel ve türetilmiş ölçme birimlerinin ulusal referans standart ve sistemlerini geliştirmek ve muhafaza etmek,

ii. Ulusal ölçüm standartlarının uluslararası ölçüm standartlarına izlenilirliğini sağlamak, bunun için Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) ve diğer ülkelerin ulusal metroloji merkezleri ile gerekli teknik ve idari bağları kurmak, Türkiye'yi teknik yönden BIPM nezdinde temsil etmek,

iii. Türkiye'nin bilimsel ve teknolojik gelişimine katkıda bulunmak,

iv. Türk endüstriyel ürünlerinin kalitesini artırmak için gerekli Ulusal Metroloji Sistemi'nin kurulmasına katkıda bulunmak,

v. Ölçüm teknikleri, kalibrasyon yöntemleri ve temel metroloji alanlarında uluslararası düzeyde araştırma ve geliştirme çalışmalarına katılmak,

vi. Kamu ve özel sektörde faaliyet gösteren kalibrasyon, deney, analiz ve ölçüm laboratuvarlarına ve bu konularda çalışan kuruluşlara kalibrasyon, ölçüm, danışmanlık ve eğitim hizmeti vermek ile verilen hizmetleri belgelendirmektir.

b) Uluslararası Tanınırlık

TÜBİTAK UME, Türkiye'de yapılan ölçümlerin uluslararası geçerliliğinin sağlanması amacıyla gerekli faaliyetleri yerine getirmekle birlikte Avrupa Metroloji Enstitüleri Birliği'nin (EURAMET) de kurucu üyelerindendir.

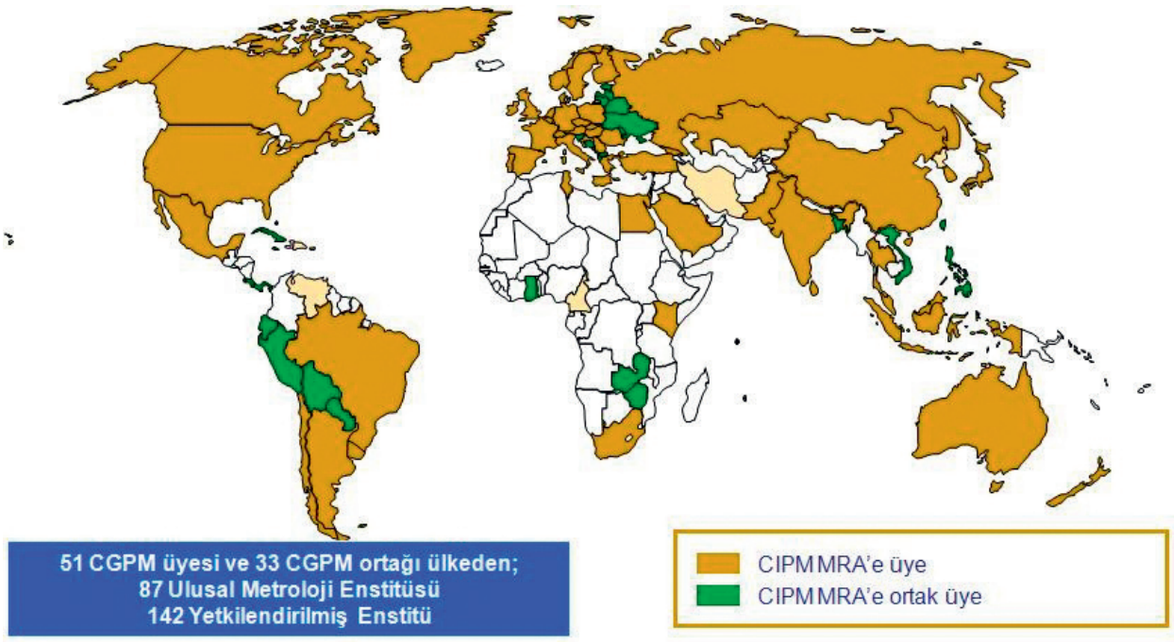
TÜBİTAK UME tarafından verilen tüm hizmetler, ISO/IEC 17025 "Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği için Genel Şartlar" standardına uygun olarak kurulmuş TÜBİTAK UME Kalite Yönetim Sistemi'nin kapsamındadır ve Kalite Yönetim Sistemi'nin uluslararası düzeyde tanınırlığı sağlanmıştır. Kalite Yönetim Sistemi ve kalibrasyon konusundaki yeterliliği, EURAMET'in Kalite Teknik Komitesi (TC-Q) tarafından denetlenmektedir.

TÜBİTAK UME, CIPM, EURAMET gibi uluslararası metroloji organizasyonları tarafından, uluslararası alanda düzenlenen laboratuvarlararası karşılaştırma veya yeterlik deney programlarında aldığı başarılı sonuçlar ile, oluşturduğu ve muhafaza ettiği ulusal standartların diğer ülkelerin ulusal standartları ile denkliğini göstermiş ve ölçüm sonuçlarının geçerliliğini kanıtlamıştır. Bu doğrultuda, TÜBİTAK UME tarafından gerçekleştirilen kalibrasyon ve ölçümler, CIPM (Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi) CMC (Kalibrasyon ve Ölçüm Kabiliyetleri) veri tabanında yer alır.

Bugün CIPM Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi (Mutual Recognition Agreement, MRA) çerçevesinde Metre Konvansiyonu'na tam ve ortak (assosiate) üyesidir. CIPM MRA'e göre, TÜBİTAK UME tarafından gerçekleştirilen kalibrasyon ve ölçümler için düzenlenen sertifika ve raporlar, bugün sayısı 85'den fazla olan CIPM MRA'e üye ülkeler tarafından tanınmaktadır (Şekil 9).

Ayrıca TÜBİTAK UME'nin kalibrasyon ve deney hizmetleri geniş bir kapsamla Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından TS EN ISO/IEC 17025 standardına göre akredite edilmiştir.

Aynı zamanda uluslararası metroloji dünyasında önemli kuruluşlar olan, IMEKO (Uluslararası Ölçme Konfederasyonu) ve EURACHEM'e (Avrupa Analitik Kimya Laboratuvarları Birliği) tam üyedir.



Şekil 9. CIPM MRA'e üye ülkeler

4.2. METROLOJİ VE STANDARDİZASYON GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

Ülkemizde yasal metroloji kapsamındaki faaliyetler, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na bağlı olan Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü tarafından yürütülür.

a) Görev ve Sorumlulukları

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Teşkilat ve Görevleri Hakkında 08 Haziran 2011 tarih ve 27598 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan 635 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ile belirlenen Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü'nün görevleri aşağıda verilmektedir.

i. Metroloji politikasını belirlemek, metroloji alanında stratejiler geliştirmek ile uygulamasını sağlamak ve izlemek,
ii. Yasal metroloji ve hazır ambalajlama alanında teknik düzenlemeler ile ilgili standart listelerini hazırlamak, uygulamaya koymak, bu alanda piyasa gözetimi ve denetimi yapmak yaptırmak,
iii. Yasal metroloji kapsamına alınacak veya kapsamdan çıkartılacak ölçü aletlerini belirlemek, yasal metroloji alanında izlenebilirliği sağlamak için gerekli teknik ve idari altyapıyı oluşturmak,
iv. Ulusal ölçü etalonlarının bulundurulma ve kontrol esaslarını belirlemek,
v. Türk Standardları Enstitüsü tarafından hazırlanan ve Bakanlık tarafından gerekli görülen standartlara ilişkin düzenlemeler yapmak ve uygulamasını sağlamak,
vi. Yasal metroloji ve hazır ambalajlama alanında teknik düzenlemesi ve standardı bulunmayan ürünlerin denetimine esas olacak özellikleri tespit etmek veya ettirmek,
vii. Metroloji, standardizasyon, akreditasyon ve uygunluk değerlendirmesi alanlarında stratejiler belirlemek, bunların uygulanmasında ilgili kuruluşlar arasında koordinasyonu sağlamak,
viii. Laboratuvarlar kurmak veya kurdurmak, kurulan laboratuvarların belirlenen usul ve esaslar çerçevesinde çalışmalarını sağlamak ve kontrol etmek,
ix. Yasal metroloji alanında uluslararası gelişmeleri izlemek ve değerlendirmek, bu alanda faaliyet gösteren uluslararası kuruluşlara katılmak ve işbirliği yapmak,

x. Yasal metroloji alanında yetkilendirilecek uygunluk değerlendirme kuruluşları ile teknik hizmet kuruluşlarının taşıması gereken nitelikleri belirlemek, bunları görevlendirmek, gerektiğinde görevlendirmeyi geçici olarak durdurmak veya iptal etmek,

xi. Bakan tarafından verilen benzeri görevleri yapmak.

4.3. TÜRK AKREDİTASYON KURUMU (TÜRKAK)

TÜRKAK, uygunluk değerlendirmesi alanında ülkemizdeki ulusal akreditasyon kuruluşu olup, ülkemizde üretilen malların piyasalarda dolaşımı için, anlaşmaların öngördüğü şekilde; güvenilir ve şeffaf uygunluk değerlendirmesi işlemlerinden geçirilerek ilgili rapor ve belgelerin tanzim edilmesini sağlamak amacıyla faaliyet gösterir. TÜRKAK, Avrupa Birliği Bakanlığı ile ilgili, özel hukuk hükümlerine tabi, tüzel kişiliği haiz, idari ve mali özerkliğe sahip bir kurumdur.

a) Görev ve Sorumlulukları

Türk Akreditasyon Kurumu Kuruluş ve Görevleri Hakkında 27 Ekim 1999 tarih ve 23866 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan 4457 sayılı Kanun ve 29.06.2012 tarihli 6337 sayılı kanunda yapılan değişiklikler ile belirlenen TÜRKAK'ın görevleri aşağıda verilmektedir.

i. Ülkemizde uygunluk değerlendirme kuruluşlarına akreditasyon hizmeti sunan tek kuruluş olarak Kurum faaliyetleri ile ilgili düzenlemeleri yapmak, akreditasyon ile ilgili gerekli kıstas ve tedbirleri belirlemek, bunları uygulamak ve gerektiğinde değiştirmek, yürürlükten kaldırmak ve ilgili önlemleri almak.

ii. Akredite edilmek üzere başvuran kuruluşların ilgili standartlara ve ölçütlere göre denetimini yapmak ve bu denetim sonucunda kuruluşun akredite edilip edilmemesine karar vermek, akredite edilen kuruluşları izlemek, akreditasyonun kapsamını değiştirmek, gerektiğinde akreditasyonu askıya almak veya iptal etmek ve akredite edilen kurum ve kuruluşlar arasında Kurumun görev alanına giren konularda işbirliğini sağlamak.

iii. Uluslararası ve bölgesel akreditasyon birlikleri ve örgütleri, ülkelerin akreditasyon kuruluşları ve akreditasyon kuruluşu bulunmayan ülkelerdeki akreditasyonla ilgili kurum ve kuruluşlarla ilişkiler kurmak ve iş birliğinde bulunmak.

iv. Akreditasyon amacıyla başvuran kuruluşların müracaatı, değerlendirilmesi ve akredite edilmesi ile ilgili olarak elde edilmiş bilgilerin gizliliğini korumak.

v. Yurt içinde ve yurt dışında, akreditasyonun önemini ve kalite bilincini artırıcı faaliyetlerde bulunmak, görev alanına giren konularda eğitim vermek, araştırma ve yayın yapmak.

vi. Kurum faaliyetlerinin icrası için hizmet almak, taşınır ve taşınmaz mal satın almak, yaptırmak, satmak, kiralamak.

vii. İyi laboratuvar uygulamaları konusunda ulusal izleme otoritesi olarak hizmet vermek.

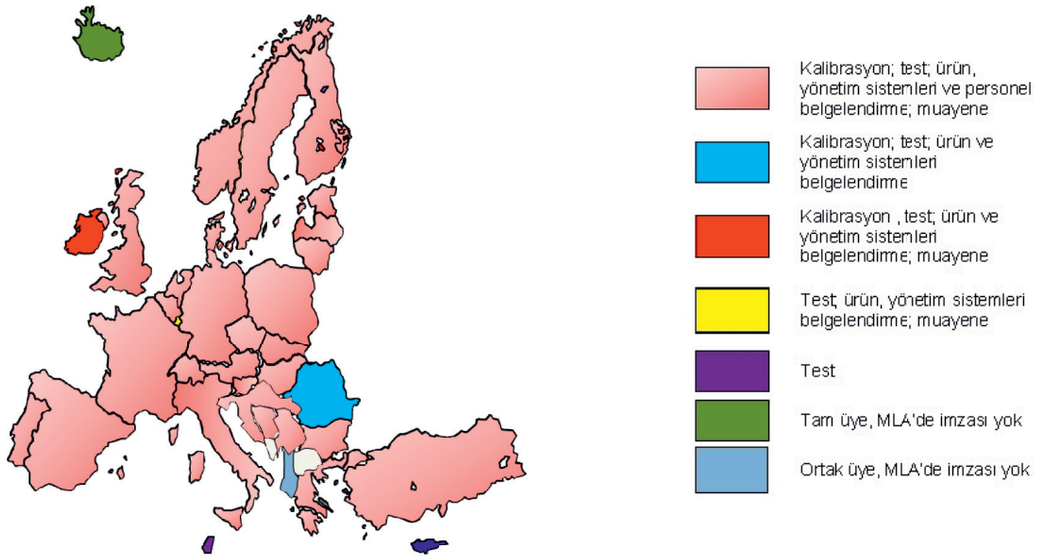
viii. Faaliyet alanıyla ilgili diğer görevleri yerine getirmek.

b) Uluslararası Tanınırlık

Akreditasyon kuruluşlarının uluslararası tanınabilirliği, ticarette malların serbest dolaşımının sağlanması için önemli bir husustur. Avrupa Akreditasyon Birliği (EA), üye ülkeler ve üye ülkelerin akreditasyon sistemleri arasında karşılıklı güveni kurmak ve bu güvenin kalıcılığını sağlamak amacıyla kurulmuştur. Karşılıklı tanıma, üye ülkelerin akreditasyon kuruluşlarının sistemlerinin, belgelerinin ve raporlarının karşılıklı olarak eşitliğini kabul eden anlaşmalar ile sağlanır. Bu durumda; belirli ölçütleri sağlayan ve Çok Taraflı Anlaşmasına (MLA) taraf olan Akreditasyon Kuruluşu tarafından verilen akreditasyon belgesinin uluslararası geçerliliği söz konusudur.

TÜRKAK, ülkemizdeki uygunluk değerlendirme kuruluşlarının verdiği sertifikaların tanınabilirliğini sağlamak amacıyla, kuruluşu itibariyle, akreditasyon faaliyetlerini Avrupa Birliği'nin ilgili düzenlemeleri ile uyumlu hale getirerek Karşılıklı Tanıma Anlaşmasına taraf olabilmek üzerinde önemle durmuştur.

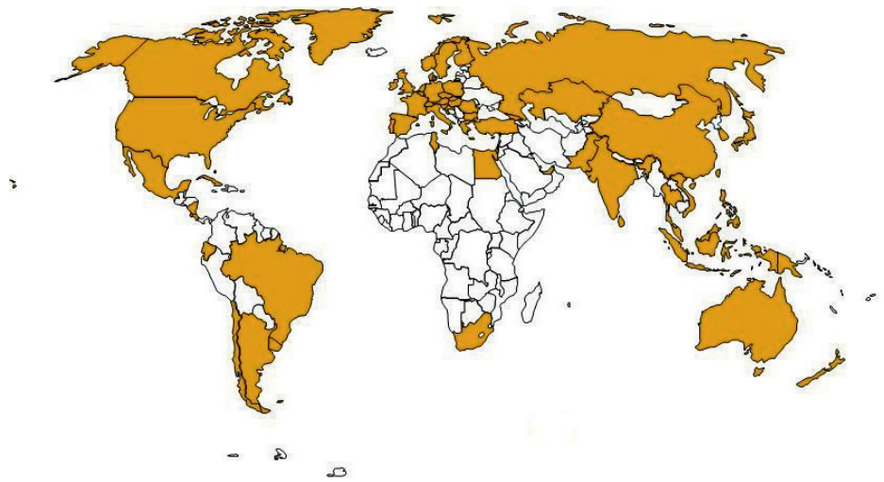
Bu kapsamda TÜRKAK'ın laboratuvar, muayene ve sistem belgelendirme alanlarındaki faaliyetleri, EA tarafından denetlenmiş ve başarı ile sonuçlanan denetime istinaden TÜRKAK Çok Taraflı Anlaşmasını (MLA) 2006 yılında imzalamıştır. 2008 yılında, personel, ürün, çevre yönetim sistemleri belgelendirme alanlarında da denetimden başarı ile geçerek EA ile tüm alanlarda MLA imzalamış ve faaliyet gösterdiği tüm alanlarda uluslararası tanınırlığı olan bir akreditasyon kuruluşu haline gelmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. EA ve MLA üyesi ülkeler

Uluslararası Laboratuvar Akreditasyonu Birliği'ne (ILAC) tam üye olarak, 10 Mayıs 2006 tarihi itibariyle deney ve kalibrasyon laboratuvarları alanında Karşılıklı Tanıma Anlaşmasını (MRA) imzalanmıştır (Şekil 11).

TÜRKAK, IAF (Uluslararası Akreditasyon Forumu) ile de faaliyet gösterdiği tüm alanlarda Karşılıklı Tanıma Anlaşmasını imzalamıştır.



Şekil 11. ILAC MRA üyesi ülkeler

4.4. TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ (TSE)

Türk Standardları Enstitüsü; her türlü madde ve mamüller ile usul ve hizmet standartlarını yapmak amacıyla 18.11.1960 tarih ve 132 sayılı kanunla kurulmuştur. Enstitü, tüzel kişiliği haiz, özel hukuk hükümlerine göre yönetilen bir kamu kurumu olup, kısa adı ve markası TSE'dir.

Ülkemizin rekabet gücünü artırmak, ulusal ve uluslararası düzeyde ticaretini kolaylaştırmak ve toplumun yaşam düzeyini yükseltmek için; standardizasyon, uygunluk değerlendirme, deney ve kalibrasyon faaliyetlerini tarafsız, bağımsız, etkin ve güvenilir olarak sağlamak misyonu ile görevlerini Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı altında sürdürmektedir.

TSE tarafından kabul edilen standartlar Türk Standardı adını alır. Bu standartlar ihtiyari olup, standardın ilgili olduğu bakanlığın onayı ile mecburi kılınabilir. Bir standardın mecburi kılınabilmesi için Türk Standardı olması şarttır. Mecburi kılınan standartlar Resmi Gazete'de yayımlanır.

a) Görev ve Sorumlulukları

Türk Standardları Enstitüsü'nün görevleri şunlardır:

i. Her türlü standardı hazırlamak ve hazırlatmak.
ii. Enstitü bünyesinde veya hariçte hazırlanan standartları tetkik etmek ve uygun bulduğu takdirde Türk Standardları olarak kabul etmek.
iii. Kabul edilen standartları yayımlamak ve ihtiyari olarak uygulanmalarını teşvik etmek, mecburi olarak yürürlüğe konmalarında fayda görülenleri ilgili bakanlığın onayına sunmak.
iv. Kamu sektörü ve özel sektörün talebi üzerine standartları veya projelerini hazırlamak ve görüş bildirmek.
v. Standartlar konusunda her türlü bilimsel teknik incelemelerle araştırmalarda bulunmak, yabancı ülkelerdeki benzer çalışmaları takip etmek, uluslararası ve yabancı standart kurumları ile ilişkiler kurmak ve bunlarla işbirliği yapmak.
vi. Üniversiteler ve diğer bilimsel ve teknik kurum ve kuruluşlarla işbirliği sağlamak, standardizasyon konularında yayım yapmak, ulusal ve uluslararası standartlardan arşivler oluşturmak ve ilgililerin faydalanmalarına sunmak.
vii. Standartlarla ilgili araştırma yapmak ve ihtiyari standartların uygulanmasını kontrol etmek için laboratuvarlar kurmak, kamu sektörü veya özel sektörün isteyeceği teknik çalışmaları yapmak ve rapor vermek.
viii. Yurtta standart işlerini yerleştirmek ve geliştirmek için elemanlar yetiştirmek ve bu amaçla kurslar açmak ve seminerler düzenlemek.
ix. Standartlara uygun ve kaliteli üretimi teşvik edecek çalışmalar yapmak ve bunlarla ilgili belgeleri düzenlemek.
x. Metroloji ve kalibrasyon ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmak ve gerekli laboratuvarları kurmak.
xi. Türk Standardları Enstitüsü'nün bu görevlerinin öncelik esasına göre tanzimi Genel Kurul'ca kararlaştırılır ve ilgililere duyurulur.

b) Uluslararası Tanınırlık

TSE, çeşitli ülkelerdeki muadil kuruluşlarla imzalanan ikili işbirliği anlaşmaları çerçevesinde, bu kuruluşlarla ilişkilerimizin yürütülerek, işbirliği anlaşmalarının gereklerinin yerine getirilmesini sağlamaktadır.

TSE, ISO, IEC, CEN, CENELEC, EOQ, BASB, RISCAM, SMIIC gibi bölgesel ve uluslararası kuruluşların üyesi olup, bu kuruluşların çeşitli faaliyetlerinde ve politikalarının geliştirilmesine aktif rol oynamakta ve stratejik yaklaşım ve politikalarının şekillendirilmesine destek sağlamaktadır.

5. ULUSLARARASI BİRİMLER SİSTEMİ (SI)

Metre ve kilogram üzerine kurulu bir birimler sistemi olan metrik sistemin dayandığı fikir Fransız devrimi sırasında ortaya çıktı. 1799 yılında metre ve kilogram için iki platin referans standart üretilerek, Paris'teki Fransız Ulusal Arşivine verildi. Fransız Ulusal Meclisinin, bütün dünyada kullanılabilecek yeni bir birimler sisteminin hazırlanması amacıyla Fransız Bilimler Akademisi'ni görevlendirmesinden sonra, 1946 yılında MKSA ölçüm sistemi (metre, kilogram, saniye, amper) Metre Konvansiyonu'na bağlı olan ülkeler tarafından kabul edildi. 1954 yılında MKSA birimler sistemi kelvin ve kandela birimlerini de içine alacak şekilde genişletildi. Bu gelişme üzerine, bu sistem Uluslararası Birimler Sistemi (SI) olarak yeniden adlandırıldı.

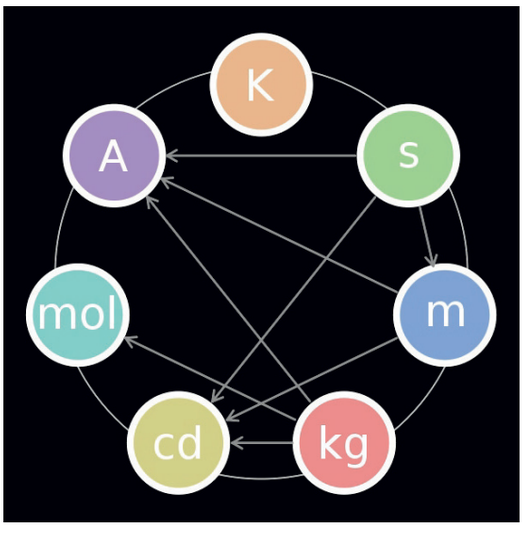
SI birimler sistemi, 1960 yılında düzenlenen 11. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM) aşağıdaki tanımla belirtildi:

"Uluslararası Birimler Sistemi (SI), CGPM tarafından benimsenen ve önerilen birbiriyle tutarlı birimlerden oluşan bir sistemdir".

SI birimler sistemi, 1971 yılında düzenlenen 14. CGPM Konferansı'nda, madde miktarı temel birimi olan mol'u içine alacak şekilde tekrar genişletildi. Bugünkü haliyle, SI birimler sistemi, yedi temel birim ve türetilmiş birimlerden oluşan tutarlı bir sistemdir. Ayrıca, SI birimler sistemi dışında kalan diğer bazı birimlerin SI birimleri ile beraber kullanılması kabul görmektedir.

5.1. TEMEL BİRİMLER

Bir temel birim, belirli bir büyüklükler sistemindeki bir temel büyüklüğün ölçüm birimidir. Metrolojik araştırmalar sonucunda, her SI biriminin tanımında ve gerçekleştirilmesinde daha yüksek kesinlik düzeyine ulaşma ihtimali ortaya çıktıkça, birimin tanımında ve gerçekleştirilmesinde değişiklikler yapılmaktadır. Örneğin, metrenin 1889 yılındaki tanımı, Paris'te bulunan uluslararası platin-iridyum prototipine dayalı idi. 1960 yılında metre, kripton-86'nın belirli bir spektral hattının 1 650 763,73 dalgaboyu olarak yeniden tanımlandı. 1983'e gelindiğinde, bu tanımın yetersiz kaldığının anlaşılması üzerine metre, ışığın 1/299 792 458 saniyelik zaman aralığında boşlukta aldığı yol olarak yeniden tanımlanmış ve bu tanım iyot-kararlı helyum-neon lazerinin ışınım dalgaboyu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yeni tanımlama ile 10^{-7} m olan bağıl belirsizlik değeri 10^{-11} m'ye düşürülmüştür.



7 adet olan temel SI birimlerinin tanımı aşağıda verilmiştir:

Metre, ışığın saniyenin 1/299 792 458 kesri zaman aralığında vakum ortamda kat ettiği mesafedir.

Kilogram, uluslararası kilogram prototipinin kütlesine eşittir.

Saniye, en düşük enerji seviyesindeki sezyum-133 atomunun iki süper-ince seviye arasındaki geçiş ışınımının 9 192 631 770 periyoduna karşılık gelen süredir.

Amper, dairesel kesiti ihmal edilebilir, sonsuz uzunlukta iki düz paralel iletkenin vakum ortamda 1 metre aralıkla yerleştirilmesi halinde, bu iletkenler arasında 2×10^{-7} newton/metre'ye eşit gücü üretebilecek sabit akımdır.

Kelvin, suyun üçlü noktasının termodinamik sıcaklığının 1/273,16 kesridir.

Mol, karbon-12'nin 0,012 kg'ının içerdiği atom sayısı kadar temel öğe içeren bir sistemin madde miktarıdır. Mol kullanıldığında, temel öğeler belirtilmelidir ve bu temel öğeler atomlar, moleküller, iyonlar, elektronlar, diğer parçacıklar veya parçacıkların belirli grupları olabilir.

Kandela, 540×10^{12} Hz frekansında tek renk ışınım yayan ve 1/683 watt/steradyan ışıma şiddetine sahip bir kaynağın belirli bir doğrultudaki ışık şiddetidir.

Tablo 1. Temel SI birimleri

Temel Büyüklükler	Birim	Sembol
uzunluk	metre	m
kütle	kilogram	kg
zaman	saniye	s
elektrik akımı	amper	A
termodinamik sıcaklık	kelvin	K
madde miktarı	mol	mol
ışık şiddeti	kandela	cd

5.2. TÜRETİLMİŞ BİRİMLER

Türetilmiş birim belirli bir büyüklükler sistemi içerisinde türetilmiş bir büyüklüğün ölçüm birimidir.

Türetilmiş SI birimleri, büyüklükler arasındaki fiziksel ilişkilere göre temel SI birimlerinden türetilmiştir.

Örnek: Uzunluk miktarı ölçüm birimi m ve zaman miktarı ölçüm birimi s arasındaki fiziksel ilişkiden hız ölçüm birimi m/s türetilebilir.

Türetilmiş birimler, çarpma ve bölmenin matematiksel sembolleri kullanılarak temel birimler türünden ifade edilir. Bunlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Temel SI birimleri ile ifade edilen türetilmiş SI birimler

Türetilmiş Büyüklükler	Birim	Temel SI Birimleri Cinsinden
alan	metrekare	m^2
hacim	metreküp	m^3
hız	saniye başına metre	m/s
ivme	saniye kare başına metre	m/s^2
yoğunluk, kütle yoğunluğu	metreküp başına kilogram	kg/m^3
yüzey yoğunluğu	metrekare başına kilogram	kg/m^2
akım yoğunluğu	metrekare başına amper	A/m^2
manyetik alan şiddeti	metre başına amper	A/m
madde miktarı konsantrasyonu	metreküp başına mol	mol/m^3
kütle konsantrasyonu	metreküp başına kilogram	kg/m^3
parlaklık	metrekare başına kandela	cd/m^2

CGPM, bazı türetilmiş birimler için özel isimler ve sembollerin kullanılmasını onaylamıştır. Bunlar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Özel isim ve sembolleri olan türetilmiş SI birimleri

Türetilmiş Büyüklükler	Birim	Sembol	Diğer SI Birimleri Cinsinden	Temel SI Birimleri Cinsinden
düzlem açısı	radyan	rad	1	m/m
katı açı	steradyan	sr	1	m^2/m^2
frekans	hertz	Hz		s^{-1}
kuvvet	newton	N		$m\ kg\ s^{-2}$
basınç, gerilme	paskal	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
enerji, iş, ısı miktarı	joule	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
güç, ışıma akısı	watt	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
elektrik yükü, elektrik miktarı	coulomb	C		s A
elektriksel potansiyel farkı, elektromotor kuvveti	volt	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
elektriksel kapasitans	farad	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
elektriksel direnç	ohm	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
elektriksel iletkenlik	siemens	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^{-3}\ A^2$
manyetik akı	weber	Wb	V s	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$

Tablo 4. Özel isim ve sembolleri olan türetilmiş SI birimleri (*Devam*)

Türetilmiş Büyüklükler	Birim	Sembol	Diğer SI Birimleri Cinsinden	Temel SI Birimleri Cinsinden
manyetik akı yoğunluğu	tesla	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
indüktans	henry	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
sıcaklık (Celsius)	Celsius derece	°C		K
ışık şiddeti akısı	lumen	lm	cd sr	$m^2\ m^{-2}\ cd = cd$
aydınlanma şiddeti	lüks	lx	lm/m^2	$m^2\ m^{-4}\ cd = m^{-2}\ cd$
aktivite (radyoaktif çekirdek)	bekerel	Bq		s^{-1}
emilen doz, kerma, özgül enerji (açığa çıkan)	gray	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
eşdeğer doz	sievert	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
katalitik aktivite	katal	kat		s^{-1} mol

Tablo 5'de gösterildiği gibi bazı temel birimler birden fazla büyüklüğün ifadesinde kullanılır. Türetilmiş birimler sıklıkla, temel birimler ve özel isimler verilmiş türetilmiş birimlerin farklı kombinasyonları ile ifade edilebilir. Uygulamada, aynı boyuta sahip farklı büyüklükler arasında ayrım yapabilmek için özel birim isimleri ve birim kombinasyonları tercih edilir. Bu nedenle, bir ölçüm cihazı ölçülen büyüklüğü gösterdiği gibi birimi de göstermelidir.

Tablo 5. İsimleri ve sembolleri, türetilmiş SI birimlerinin özel isim ve sembollerini içeren türetilmiş SI birimleri

Türetilmiş Büyüklükler	Birim	Sembol	Temel SI Birimleri Cinsinden
dinamik viskozite	paskal saniye	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
tork	newton metre	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
yüzey gerilimi	metre başına newton	N/m	$kg\ s^{-2}$
açısal hız	saniye başına radyan	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1} = s^{-1}$
açısal ivme	saniye kare başına radyan	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2} = s^{-2}$
ısı akısı yoğunluğu, parlaklık	metre kare başına watt	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
ısı kapasitesi, entropi	kelvin başına joule	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
özgül ısı kapasitesi, özgül entropi	kilogram kelvin başına joule	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
özgül enerji	kilogram başına joule	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
ısıl iletkenlik	kelvin metre başına watt	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
enerji yoğunluğu	metre küp başına joule	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
elektrik alan kuvveti	metre başına volt	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
elektrik yük yoğunluğu	Metre küp başına coulomb	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$

Tablo 6. İsimleri ve sembolleri, türetilmiş SI birimlerinin özel isim ve sembollerini içeren türetilmiş SI birimleri (*Devam*)

Türetilmiş Büyüklükler	Birim	Sembol	Temel SI Birimleri Cinsinden
yüzey yük yoğunluğu	metre kare başına coulomb	C/m^2	m^{-2} s A
elektrik akı yoğunluğu, elektriksel yer değiştirme	metre kare başına coulomb	C/m^2	m^{-2} s A
elektriksel geçirgenlik	metre başına farad	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
manyetik geçirgenlik	metre başına henry	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
molar enerji	mol başına joule	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol
molar entropi, molar ısı kapasitesi	mol kelvin başına joule	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol
maruz kalma (x ve γ ışınları)	kilogram başına coulomb	C/kg	kg^{-1} s A
emilen doz oranı	saniye başına gray	Gy/s	m^2 s^{-3}
ışıma yoğunluğu	steradyan başına watt	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}
radyan	metrekare steradyan başına watt	W/(m^2 sr)	m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}
katalitik aktivite, derişim	metre küp başına katal	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

5.3. DİĞER BİRİMLER

Yaygın olarak ya da belirli alanlarda kullanıldıkları için SI birimleri ile birlikte kullanılmaları kabul edilen SI harici birimler, Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kabul edilen SI harici birimler

Büyüklük	Birim	Sembol	SI Birimleri Cinsinden Değeri
zaman	dakika	min	1 min = 60 s
	saat	h	1 h = 60 min = 3600 s
	gün	d	1 d = 24 h
düzlem açısı	derece	°	1° = (π/180) rad
	dakika	′	1′ = (1/60) ° = (p/10,800) rad
	saniye	″	1″ =(1/60) ′ = (p/648,000) rad
	grad	gon	1 gon = (π/200) rad
alan	hektar	ha	1 ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2
hacim	litre	L, ℓ	1 L = 1 ℓ =1 dm^3 = 10^{-3} m^3
kütle	ton	t	1 t = 10^3 kg

Belirli alanlarda kullanımları kabul edilen SI harici birimlere örnekler, Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Belirli konu alanlarında kullanımları kabul edilen SI harici birimler

Büyüklük	Birim	Sembol	SI Birimleri Cinsinden Değeri
basınç	bar	bar	1 bar = 100 kPa = 10^5 Pa
insan vücudundaki sıvıların basıncı	milimetre cıva	mmHg	1 mmHg ≈ 133,322 Pa
uzunluk	angstrom	Å	1 Å = 0,1 nm = 10^{-10} m
uzaklık	deniz mili	M	1 M = 1852 m
alan (kesit alanı)	barn	b	1 b = 10^{-28} m^2
hız	knot	kn	1 kn = (1852/3600) m/s

Belirli alanlarda kullanımları kabul edilen ve değerleri deneysel olarak belirlenen SI harici birimler ise, Tablo 9'da verilmiştir. Verilen sayıların son iki hanelerinin bileşik belirsizlikleri (kapsam faktörü k=1), parantez içerisinde verilmiştir.

Tablo 9. Belirli konu alanlarında kullanımları kabul edilen ve değerleri deneysel olarak belirlenen SI harici birimler

Büyüklük	Birim	Sembol	Tanım	SI Birimleri Cinsinden Değeri
enerji	elektronvolt	eV	1 eV, vakum ortamında 1 V potansiyel farkını geçen bir elektronun kinetik enerjisidir.	1 eV=1,602 176 53 (14)×10^{-19} J
kütle	atomik kütle birimi	u	1 u, taban seviyedeki ^{12}C çekirdeğinin nötr haldeki bir atomunun hareketsiz kütlesinin 1/12'sine eşittir.	1 u=1,660 538 86 (28)×10^{-27} kg
uzunluk	astronomik birim	ua		1 ua=1,495 978 706 91 (6)×10^{11} m

5.4. BİRİM SEMBOLLERİ VE YAZIM KURALLARI

1. Semboller büyük harfle yazılmaz. Ancak,
   - birimin adı, bir kişi adından geliyorsa,
   - cümle sembol ile başlıyorsa

   sembolün ilk harfi büyük harfle yazılır. Sadece litre bu kuralın dışında olup, L veya l sembolü ile gösterilir.

   Doğru: Kelvin için K, metre için m, paskal için Pa

   Yanlış: Kelvin için k, metre için M, paskal için pa
2. Semboller çoğul eki alamazlar.
3. Sembollerden sonra, cümle sonuna geldikleri durumlar hariç, nokta işareti konulmaz.
4. Birimlerin çarpımı söz konusu olduğunda, birimler arasında çarpım işlemini belirten ortalı nokta (·) veya boşluk kullanılmalıdır.

   Doğru: N·m veya N m

   Yanlış: Nm veya N×m
5. Birimlerin arasında bölme işlemi söz konusu olduğunda, bölme işareti (/) veya negatif üs kullanılmalıdır.

   Doğru: m/s veya $m \cdot s^{-1}$ veya $m\ s^{-1}$

   Yanlış: m÷s veya $m \times s^{-1}$
6. Birleştirilmiş birimler sadece tek bir bölme işareti içerebilir. Kompleks kombinasyonlar için, parantez veya negatif üslerin kullanılmasına izin verilmiştir.

   Doğru: m/s^2 veya $m\ s^{-2}$; $m\ kg/(s^3\ A)$ veya $m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$

   Yanlış: m/s/s ; $m\ kg/s^3/A$ veya $m\ kg/s^3\ A$
7. Semboller, takip ettikleri sayısal değerlerden bir boşluk ile ayrılmalıdırlar.

   Doğru: 5 kg, 10 m

   Yanlış: 5kg, 10m
8. Birim sembolleri ile birim adları birlikte kullanılmamalıdır.

5.5. SAYISAL GÖSTERİM

1. Ondalık işaretinin sağında ve solunda, her üç basamak grubu (bölük) arasında birer boşluk bırakılmalıdır (örn. 15 739,012 53). Dört basamaklı sayılarda boşluk bırakılmayabilir. Virgül, binlik ayracı olarak kullanılmamalıdır.
2. Matematiksel işlemler, birim adlarına değil, sadece birimsel sembollere uygulanmalıdır. Örneğin, kilogram/metreküp yanlış, kg/m^3 doğru bir gösterimdir.
3. Hangi birimin hangi sayısal değere ait olduğu ve bir büyüklük değerine hangi matematiksel işlemlerin uygulandığı açık olmalıdır.

   Doğru : 35 cm × 48 cm 100 g ± 2 g

   Yanlış : 35 × 48 cm 100 ± 2 g

6. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

"Belirsizlik" sözcüğü tek başına kullanıldığında "kesin olmayış", "güvenilir olmayış" gibi olumsuz anlamlar çağrıştırır. Ancak, "ölçüm belirsizliği" veya "kalibrasyon sonucunun belirsizliği" gibi teknik deyim biçiminde kullanıldığında, daha özgül, daha masum bir anlama bürünür. Ölçüm belirsizliği ölçüm sonucuyla beraber mutlak bir surette yer alması gereken bir parametredir. Bunun bir çok nedeni vardır. Örneğin, herhangi bir laboratuvar belirli bir büyüklüğün ölçümünü yaparak tek bir sonuç beyan etmiştir. Bir başka laboratuvar da aynı ölçümü gerçekleştirdikten sonra farklı bir sonuca ulaşmıştır. Bu durumda iki laboratuvar tarafından bulunan değerler arasındaki farkın neden kaynaklandığının yorumu bir hayli zordur. Oysa, ölçüm sonucuyla birlikte belirsizlik değeri de verilirse, her laboratuvar bu ölçümde sonuçların bulunabileceği aralık güvence altına almış olacaktır. İki laboratuvarın güvence altına aldıkları aralıkların örtüşmesi halinde yoruma açık bir durum söz konusu değildir. Dolayısıyla, ölçüm belirsizliği saptanıp ölçüm sonucu ile birlikte verildiğinde, elde edilen değerlerin olası hangi aralıkta yer alacağını ve güven düzeyini yansıtır [22]. İki farklı laboratuvar aynı ölçümü gerçekleştirme yeteneğine sahip olduğu zaman, daha düşük belirsizlik değeri veren laboratuvarın teknik kapasitesi diğerine göre daha üstün sayılır.

Ölçüm belirsizliğinin hangi şekilde ve ne amaçla kullanıldığını açıklamak için basit bir laboratuvarlararası karşılaştırma örneğini inceleyelim. 5 farklı metroloji laboratuvarının 100 g'lık nominal kütleye sahip bir kütle standardının kalibrasyonunu gerçekleştirdiğini varsayalım. Her bir laboratuvar tarafından kütle değeri ve bunun belirsizliği için beyan ettikleri değer Tablo 10'da verilmiştir.

Ölçüm sonucu rapor edilirken, sonucun kalitesini belirten sayısal bir gösterge olmalıdır ki bu sonucu kullanan kişiler sonucun güvenilirliğini tayin edebilsinler.

Ölçüm kalitesinin ve ölçüm sonuçlarının güvenilirliğinin göstergesi belirsizlik değeridir.

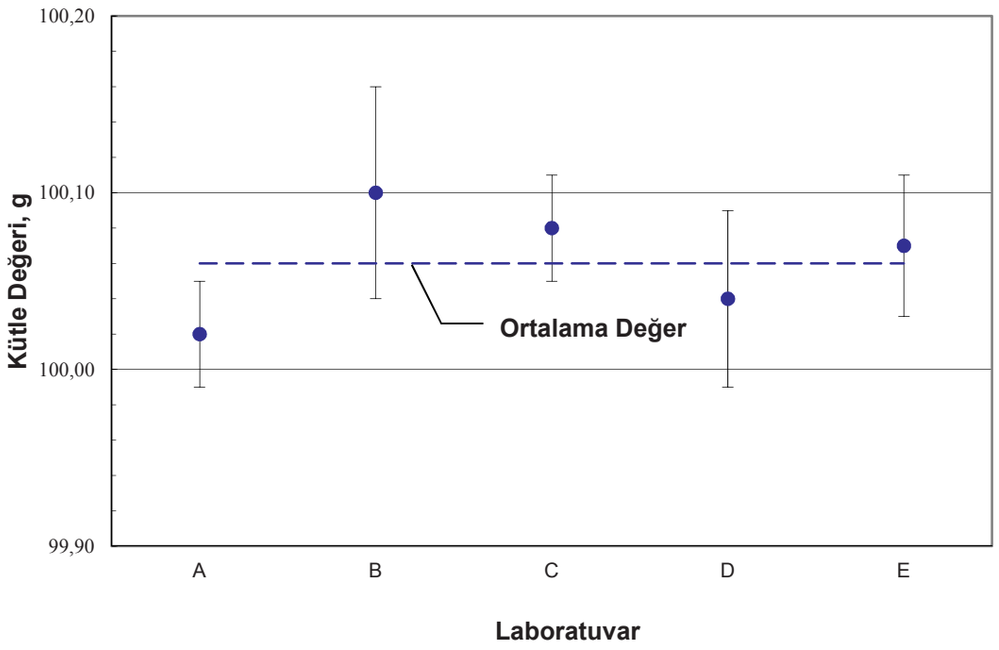
Tablo 10. Laboratuvarlararası karşılaştırma sonuçları

Laboratuvar	Ölçüm Sonucu (g)	Belirsizlik (g)	Ortalamadan Sapma (g)
A	100,02	0,03	-0,04
B	100,10	0,06	+0,04
C	100,08	0,03	+0,02
D	100,04	0,05	-0,02
E	100,07	0,04	+0,01
Ortalama	**100,06**		

Laboratuvarların beyan ettikleri kütle değerleri m_A, m_B, m_C, m_D ve m_E kullanılarak ortalama kütle değeri ($\overline{m}$) aşağıdaki formülle hesaplandığında 100,06 g bulunmuştur.

$$\overline{m} = \frac{m_A + m_B + m_C + m_D + m_E}{5} = \frac{100{,}02 + 100{,}10 + 100{,}04 + 100{,}07}{5}\,g = 100{,}06\,g$$

Tablodaki veriler incelendiğinde, sadece laboratuvarların beyan ettikleri belirsizlik değerleri dikkate alınırsa en iyi kalibrasyon yeteneğine A ve C laboratuvarlarının sahip olduğu kararı verilebilir. Çünkü A ve C laboratuvarları karşılaştırmada kullanılan referans kütlenin kalibrasyonunu diğer laboratuvarlardan daha düşük bir belirsizlikle gerçekleştirmişlerdir.



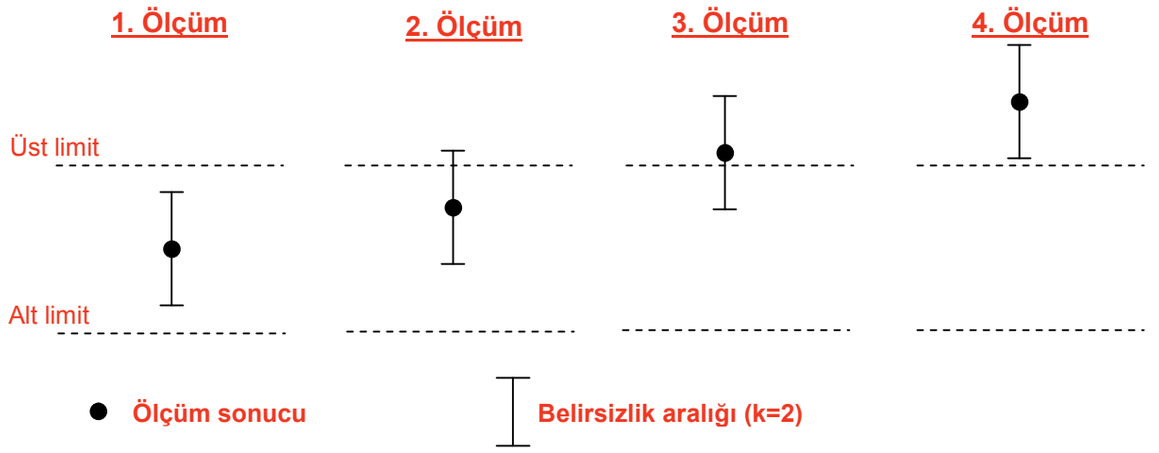
Şekil 12. Karşılaştırma sonuçlarının grafiksel gösterimi

Ancak, laboratuvarlararası karşılaştırmaların sonuçlarını değerlendirme aşamasında daha önemli bir kriter kullanılır. Kritere göre her laboratuvarın beyan ettiği değerin ortalama değerden farkı beyan ettiği belirsizlikten küçük olmalıdır. İkinci kritere göre değerlendirme yapılırsa A laboratuvarının karşılaştırma sonuçlarının tatmin edici olmadığı kararına varılabilir. Verilen bu örnekte en basit değerlendirme örneği kullanılmıştır. Karşılaştırmalarda ortalama değer yerine karşılaştırmanın referans değeri olarak adlandırılan parametre kullanılmaktadır. Referans değer ise farklı ölçüm dallarında farklı yöntemlerle hesaplanır. Bu aşamada yukarıdaki örnekteki gibi genel ortalama hesaplanabilir veya sadece laboratuvarların beyan ettikleri sonuç değil belirsizlik değerini de dikkate alan ağırlıklı ortalama veya medyan değerleri kullanılabilir [22].

Belirsizlik değerinin ölçüm sonucunun değerlendirilmesi ve yorumlanmasında da önemli rol aldığı daha önce açıklanmıştı. Örneğin, bir büyüklüğün ölçümünün yapıldığını varsayalım. Uluslararası standartların şartlarına göre ölçüm sonucu belirli limitler içinde olmalıdır. Sonucun limitler içinde olup olmadığı kararı ise, ölçüm belirsizliği de dikkate alınarak verilmelidir. Sonuçlara göre verilebilecek değişik karar ve yorum örnekleri Şekil 13'de gösterilmiştir [23].

Şekil 13'de görüldüğü gibi 1. ölçüm sonucu belirsizlikle birlikte istenilen limitler içindedir. 4.ölçümde ise sonuç tamamen limitler dışında kalıyor. Bu tür durumlarda ölçüm sonuçlarının inceleme ve özel yorumlara açık bir yönü kalmıyor. 2. ve 3. ölçüm sonuçları ise yoruma açıktır.

Bu durumda her ölçümdeki hesaplamalar, ara veriler ve özellikle de belirsizliğe katkıda bulunan etkenler özel olarak incelenmelidir [10].



Şekil 13. Ölçüm sonucunun değerlendirilmesi

6.1. GENEL TANIMLAR VE KAVRAMLAR

Ölçüm belirsizliği hesaplamalarında kullanılan temel yöntemlerden bahsetmeden önce, metrolojide sık sık kullanılan bazı tanımların açıklanması gerekir. Bu tanımlar "Uluslararası Metroloji Sözlüğü – Temel ve Genel Kavramlar, İlgili Terimler (VIM)" [10] dokümanına uygun olarak verilmiştir.

Ölçüm

Bir büyüklüğe atanabilecek bir veya daha fazla büyüklük değerinin deneysel olarak elde edilme sürecidir.

- Nominal özelliklerin ölçümü yapılamaz.
- Ölçüm, büyüklüklerin karşılaştırılması anlamına gelirken, öğelerin sayılmasını da içerir.
- Ölçüm, ölçüm sonucunun kullanımına uygun bir büyüklüğün, bir ölçüm prosedürünün ve belirli bir ölçüm prosedürüne uygun olarak çalışan kalibreli bir ölçüm sisteminin ölçüm şartları ile birlikte tanımlanmış olmasını gerektirir.
- Ölçüm ile ölçülecek niceliğin değeri değil miktarı ortaya konulur.

Ölçme İşlemi

Ölçme işlemi aşağıdaki sıralama göz önünde bulundurularak yapılır.

- Ölçülecek nesne belirlenir,
- Ölçülecek büyüklük belirlenir,
- Ölçülecek metod belirlenir,
- Ölçülecek cihazlar seçilir ve ölçüm düzeneği kurulur,
- Ölçme işlemi gerçekleştirilir,
- Ölçme sonuçları değerlendirilir ve kontrol edilir.

Ölçüm Sonucu

Ölçümün sonucu ilgili mevcut bilgilerle birlikte, ölçülene atfedilen büyüklük değerleri kümesidir.

- Bir ölçümün sonucu, genellikle büyüklük değerleri serisi ile "ilgili bilgileri" içerir, öyle ki bu bilgilerden bazıları ölçülen büyüklüğü diğerlerine göre daha iyi ifade edebilir. Bu durum, bir olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) şeklinde ifade edilebilir.
- Bir ölçüm sonucu genellikle tek bir ölçülen büyüklük değeri ve ölçüm belirsizliği ile ifade edilir. Eğer ölçüm belirsizliği bazı nedenlerle ihmal edilebilir kabul edilirse, ölçüm sonucu tek bir ölçülen büyüklük değeri olarak ifade edilebilir. Ölçüm sonucu, pek çok alanda bu şekilde ifade edilir.
- Ölçüm sonucu, geçmiş kaynaklarda ve VIM'in önceki baskısında ölçülen büyüklüğe atfedilen bir değer olarak tanımlanmış, kullanım yerine göre gösterge, düzeltilmemiş sonuç ya da düzeltilmiş sonuç şeklinde açıklanmıştır.

Ölçme sonucunda elde edilen değerin aşağıdakilerden hangisi olduğu açıkça belirtilmelidir.

- Gösterge değeri
- Düzeltilmemiş sonuç
- Düzeltilmiş sonuç

Gösterge Değeri, bir ölçüm sistemi ya da ölçüm cihazı ile sağlanan büyüklük değeridir.

- Bir gösterge değeri, görsel ya da sesli olarak verilebilir veya başka bir cihaza aktarılabilir. Bir gösterge değeri, sıklıkla analog çıktılarda gösterge ibresinin konumu, dijital çıktılarda görsel veya basılı rakamlar, kod çıktıları için bir kod deseni veya maddi ölçüt için atanmış bir büyüklük değeri ile verilebilir.
- Gösterge değeri ile buna karşılık gelen ölçülen büyüklüğün değerinin aynı tür büyüklük değerleri olması gerekli değildir.

Düzeltilmemiş Sonuç, sistematik hatalar için düzeltme yapılmadan elde edilen yalın ölçüm sonucudur.

Düzeltilmiş Sonuç, sistematik hatalar için düzeltme yapıldıktan sonra elde edilen ölçüm sonucudur.

Rastgele hatalara bağlı olarak ve sistematik hatalardan kaynaklanan düzeltmelerin yeterince belirlenememesi yüzünden düzeltilmiş ölçüm sonucu, ölçülen büyüklükle aynı değildir.

Oluşturulan büyüklük ile bunu ölçen sistemin ortaya koyduğu değerler hiçbir zaman kesin olarak bilinemez; bu iki değer sadece ölçmeleri beklenen mutlak değerlerine yaklaşık bir sonucu ortaya koyarlar.

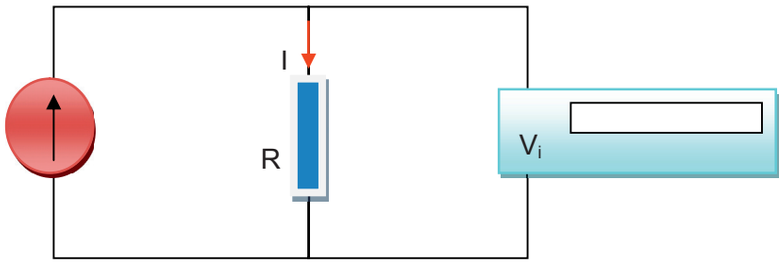
Örnek 1: Belirli bir sıcaklıktaki levha kalınlığını mikrometre yardımıyla ölçmek istiyoruz. Belirlenen sıcaklığa yakın bir değere levhanın sıcaklığı getiriliyor ve kalınlığı da numunenin belirli bir noktasından ölçülüyor. Bu noktadaki ve sıcaklıktaki numune kalınlığı mikrometre tarafından uygulanan basınç altında ölçülen büyüklüktür.

Aşağıdakilerin her biri ölçüm sonucuna etki eden bilinmeyen hata parametrelerinden biri olabilir:

- Tekrar edilen her ölçüm için mikrometrenin gösterdiği okuma değerleri arasındaki fark,
- Mikrometrenin kalibrasyon belirsizliği,
- Sıcaklık ve uygulanan basınçtan kaynaklanan hatalar.

Ortam sıcaklığı, barometrik basıncın ve nemin mikrometre ve numune levha (veya her ikisi) üzerindeki etkilerinden kaynaklanan hatalar

Örnek 2: Şekil 14'de verilen devrede R direnci üzerinde V_i gerilimi oluşturan akım değerini belirleyelim:



Şekil 14. Ölçüme ait devre şeması

Ohm kanununa göre, devreden geçen akım Eşitlik (1)'deki gibi ifade edilir.

$$I = \frac{V}{R} \tag{1}$$

R direncinin kalibrasyon sertifikasında beyan edilen değeri, T_0 sıcaklığı için R_s ise, T sıcaklığında devredeki akımın düzeltilmiş değeri;

$$I = \frac{V}{R_s\left(1+\alpha\left(T-T_0\right)\right)} \tag{2}$$

olarak belirlenir. Eşitlik (2)'de α, R direncini sıcaklık katsayısıdır.

Düzeltme

Düzeltme, tahmini bir sistematik etkinin telafisidir.

Telafi, bir ilave veya faktör gibi farklı şekillerde olabilir, ya da bir tablodan elde edilebilir.

Düzeltme Faktörü

Sistematik hataların düzeltilmesi için ölçüme ait düzeltilmemiş sonuç ile çarpılan sayısal faktördür.

Düzeltme ya da düzeltme faktörü uygulandıktan sonra sistematik etkiden kaynaklanan hatanın sıfır olduğu varsayılır.

Ölçüm Hatası

Ölçülen büyüklük değeri ile referans büyüklük değeri arasındaki farkıdır.

"Ölçüm hatası" kavramı iki durum için kullanılabilir:

a) Başvurulacak tek bir referans büyüklük değeri olması durumunda, öyle ki, bir ölçüm standardı kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon sonucu elde edilen ölçülen büyüklük değerinin ihmal edilebilir bir ölçüm belirsizliğine sahip olması veya kabul edilen bir büyüklük değerinin verilmesi halinde, ölçüm hatası bilinmektedir.

b) Ölçülenin, tek bir gerçek büyüklük değeri veya ihmal edilebilir bir aralık içerisinde gerçek büyüklük değerler kümesi ile ifade edildiği durumda ölçüm hatası bilinmemektedir.

Ölçüm hatası, üretim hatası veya diğer kusurlar ile karıştırılmamalıdır.

Ölçüm hatası, genel olarak rastgele ve sistematik hatanın birleşiminden oluşur. Birçok durumda sistematik ve rastgele hataları birbirinden ayırmak çok zordur.

Rastgele Ölçüm Hatası

Tekrarlanan ölçümlerde tahmin edilemez bir şekilde değişen ölçüm hatası bileşenidir.

- Rastgele ölçüm hatası için referans büyüklük değeri, aynı ölçülen üzerinde sonsuz kere tekrarlanan ölçümlerin ortalamasıdır.
- Tekrarlanan ölçümlerden oluşan bir serinin rastgele ölçüm hataları, genellikle sıfır olduğu varsayılan bir değer ve bu değerin varyansı ile özetlenebilen bir dağılım oluşturur.
- Rastgele ölçüm hatası, ölçüm hatası ile sistematik ölçüm hatasının farkına eşittir.

Ölçümün Sistematik Hatası

Ölçüm hatasının tekrarlanan ölçümlerde sabit kalan veya tahmin edilebilir şekilde değişen bileşenidir.

Gösterim açısından bakıldığı zaman Mutlak Hata, bulunan ölçüm sonucunu gerçek değer ile farkıdır.

Bağıl Hata ise bulunan farkı mutlak değere elde edilen değerdir. μV/V, μΩ/Ω, 10^{-6}, ppm, % şeklinde gösterilir.

Örnek: Ölçülen su yoğunluğu değeri ($\rho_{ölçülen}$) 999,96 kg/m^3 ve su yoğunluğunun nominal değeri ($\rho_{nominal}$) 1000 kg/m^3 ise mutlak ve bağıl hatayı hesaplayınız.

Mutlak Hata = $\rho_{ölçülen} - \rho_{nominal}$ = (999,96 - 1000) kg/m^3 = - 0,04 kg/m^3

$$\text{Bağıl Hata} = \frac{\text{Mutlak Hata}}{\text{Nominal Değer}} = \frac{-0{,}04\ \text{kg/m}^3}{1000\ \text{kg/m}^3} = 4\times10^{-5} = \%\ 0{,}004 = 40\ \text{ppm}$$

Ölçüm Doğruluğu

Ölçülen büyüklük değeri ile ölçülenin gerçek büyüklük değeri arasındaki uyuşmanın yakınlığıdır.

- Ölçüm doğruluğu kavramı bir büyüklük değildir ve bir sayısal büyüklük değeri ile gösterilmez. Ölçüm hatası küçüldükçe, ölçümün daha doğru olduğu söylenilir.
- Ölçüm doğruluğu terimi ölçüm gerçekliği ifadesinin yerine ve ölçüm kesinliği terimi de 'ölçüm doğruluğu' ifadesinin yerine kullanılmamalıdır. Ancak, ölçüm doğruluğu ile bu iki kavram arasında bir ilişki mevcuttur.
- Ölçüm doğruluğu bazen, ölçülene atfedilen ölçülen büyüklük değerlerinin arasındaki uyuşmanın yakınlığı olarak anlaşılır.

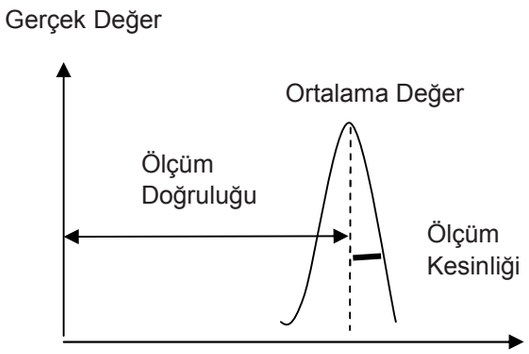
Örnek: Nominal olarak 1 m uzunluğa sahip çelik bir cetvel mikrometre düzeyinde bir doğrulukla ölçülmek istenirse ölçüm sırasındaki sıcaklık ve basınç değerlerinin uzunluk değişimine etkisi bilinmeli ve uygun doğrulukta bir matematiksel ifade ile verilmelidir. Ancak milimetre düzeyindeki bir doğrulukla ölçüm yapmak isteniyorsa yukarıda bahsedilen sıcaklık ve basınç değerlerinin ölçülmesi gerekli değildir.

Ölçüm Kesinliği

Belirli koşullar altında aynı veya benzer nesneler üzerinde tekrarlanan ölçümler ile elde edilen göstergeler veya ölçülen büyüklük değerleri arasındaki uyuşmanın yakınlığıdır.

- Genellikle ölçüm kesinliği, belirli ölçüm koşulları altında standart sapma, varyans veya varyasyon katsayısı gibi tutarsızlık ölçütleri ile sayısal olarak ifade edilir.
- Belirli koşullar için ölçümün tekrarlanabilirlik koşulları, ölçümün ara kesinlik koşulları veya ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirliği koşulları örnek olarak verilebilir.
- Ölçüm tekrarlanabilirliği, ara ölçüm kesinliği, ve ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirliğini tanımlamak için ölçüm kesinliği kullanılır. Bazen, ölçüm kesinliği yanlışlıkla ölçüm doğruluğu anlamında kullanılmaktadır.

Örneğin, "tekrarlanabilirlik şartları altında ölçüm sonuçlarının kesinliği sonuçların standart sapma değeri olarak hesaplanmış olup 2 μΩ'dur." ifadesi kabul edilebilir bir ifade iken "Ölçüm sonuçlarının kesinliği 2 μΩ'dur." ifadesi kabul edilemez.



Şekil 15. Ölçüm kesinliği, ölçüm doğruluğu ve ortalama değerin gösterimi

Deneysel Standart Sapma

Aynı ölçülen büyüklüğe ait n adet ölçümden oluşan bir seri için, aşağıdaki formülle verilen $s(x_i)$ parametresi deneysel standart sapmadır ve ölçüm sonuçların dağılımını karakterize eder;

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (3)$$

x_i : i. ölçüm sonucu

$\bar{x}$: değerlendirilen n adet sonucun aritmetik ortalamasıdır.

Standart sapma, belli bir x değerinin ne kadar saçıldığının ölçüsüdür. Birimi x'in birimi ile aynıdır.

$\frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$ ifadesi $\bar{x}$'e ait dağılımın standart sapmasıdır ve ortalamanın deneysel standart sapması olarak adlandırılır.

Ortalamanın deneysel standart sapması bazı durumlarda ortalamanın standart hatası olarak adlandırılır, ancak bu yanlış bir tanımlamadır.

Örnek: Veriler: A= {7, 8, 11, 13, 17, 21} olsun.

Verilerin aritmetik ortalaması Eşitlik (4) kullanılarak $\bar{x}_A = 12{,}8$ olarak hesaplanır.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (4)$$

Standart sapma, Eşitlik (3) kullanılarak;

$$s_A = \sqrt{\frac{1}{5} \times \left[(12{,}8-7)^2 + (12{,}8-8)^2 + \ldots + (12{,}8-21)^2\right]} = 5{,}38$$

olarak belirlenir.

Ölçüm Tekrarlanabilirliği

Ölçümün tekrarlanabilirliği koşulları altında ölçüm kesinliğidir.

Ölçümün tekrarlanabilirliği koşulu ise;

- aynı ölçüm prosedürü,
- aynı operatör,
- aynı ölçüm sistemi ile,
- aynı uygulama koşulları altında,
- aynı yerde,
- ölçümlerin aynı veya benzer numuneler üzerinde kısa bir zaman aralığında tekrarlanarak gerçekleştirilmesidir.

Bir ölçüm koşulunun tekrarlanabilirlik koşulu sayılabilmesi için belirlenmiş tekrarlanabilirlik koşullarından birisi olmalıdır.

Kimyada, "ölçümün seri içi kesinliği koşulu" bazen bu kavramı ifade etmek için kullanılır.

Ölçümün Tekrar Gerçekleştirilebilirliği

Ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirliği koşulları altında ölçüm kesinliğidir.

Ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirliği koşulu :

- farklı yerde,
- farklı operatör,
- farklı ölçüm sistemleri kullanarak,
- aynı veya benzer nesneler üzerinde tekrarlanan ölçümleri kapsayan ölçüm koşullarından her biridir.

Farklı ölçüm sistemlerinde farklı ölçüm prosedürleri kullanılabilir.

Koşulların değişip değişmediği mümkün olduğu kadar belirtilmelidir.

Ölçüm Belirsizliği

Elde edilen bilgiye dayanılarak ölçülene atfedilen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, negatif olmayan sayısal parametredir.

Ölçüm belirsizliği, düzeltmeler ve ölçüm standardına atanmış büyüklük değerleri gibi sistematik etkilerden kaynaklanan bileşenler ile tanımsal belirsizlik bileşenini içerir. Bazen öngörülen sistematik etkilerin düzeltilmesi yerine ilgili ölçüm belirsizliği bileşenleri dahil edilir.

Parametre, örneğin, standart ölçüm belirsizliği olarak adlandırılan standart sapma, onun belirli katları veya belirli kapsam olasılığına sahip olan aralığın yarı genişliği olabilir.

Ölçüm belirsizliği genel olarak birçok bileşeni içerir. Bu bileşenlerin bazıları, ölçüm serilerinden elde edilen büyüklük değerlerinin istatistiksel dağılımını kullanan A tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle belirlenir ve standart sapma ile nitelendirilir. B tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle belirlenen diğer bileşenler de, tecrübe ve diğer bilgilere dayalı olasılık yoğunluk fonksiyonlarından (PDF) elde edilen standart sapma ile nitelendirilebilir.

Genel olarak, eldeki bilgiler ışığında, ölçüm belirsizliğinin, ölçülene atfedilen belirli bir büyüklük değeri ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu büyüklük değerindeki bir değişiklik, belirsizlik değerinde de değişikliğe neden olur.

Kapsam Aralığı

Mevcut bilgiye dayalı olarak, beyan edilmiş olasılık ile ölçülene ait gerçek büyüklük değerler kümesini kapsayan aralıktır.

Seçilen ölçülen büyüklük değerinin kapsam aralığının ortasında yer almasına gerek yoktur.

Karışıklığa neden olmamak için, bir istatistiksel kavram olan “güvenilirlik aralığı” terimi kapsam aralığı yerine kullanılmamalıdır.

Kapsam aralığı, genişletilmiş ölçüm belirsizliğinden türetilebilir.

Kapsam Olasılığı

Bir ölçülene ait gerçek büyüklük değerler kümesinin belirli bir kapsam aralığı içinde bulunma olasılığıdır.

Kapsam olasılığı, GUM’da [23] “güvenilirlik seviyesi” olarak da adlandırılır.

Kapsam Faktörü

Genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin elde edilmesi için bileşik standart ölçüm belirsizliği ile çarpılan birden büyük bir sayıdır.

Kapsam faktörü genellikle k sembolü ile gösterilir

Ölçüm Modeli

Bir ölçüm içerisinde yer aldığı bilinen bütün büyüklükler arasındaki matematiksel ilişkidir.

Bir ölçüm modelinin genel gösterimi $h(Y, X_1, \ldots, X_n) = 0$ olup, burada Y, ölçüm modelindeki çıktı büyüklüğü olan ölçüleni göstermektedir. Ölçülenin büyüklük değeri, ölçüm modelindeki $X_1, \ldots, X_n$ girdi büyüklüklerine ait bilgiler kullanılarak elde edilir.

İki veya ikiden fazla çıktı büyüklüğü içeren karmaşık durumlarda ölçüm modeli birden fazla denklemden oluşur.

Model Fonksiyon

Değeri, bir ölçüm modelinin girdi büyüklüklerinin bilinen büyüklük değerleri kullanılarak hesaplandığında, ölçüm modelinin çıktı büyüklüğünün ölçülen büyüklük değeri olan büyüklüklerin fonksiyonudur.

Ölçüm modelinin çıktı büyüklüğü Y olup, $h(Y, X_1, \ldots, X_n) = 0$ olarak ifade edilen bir ölçüm modeli $Y = f(X_1, \ldots, X_n)$ şeklinde açıkca yazılabildiği durumda, f bir model fonksiyonudur. Daha genel olarak f fonksiyonu, $x_1, \ldots, x_n$ girdi büyüklük değerlerine karşılık tek bir $y = f(x_1, \ldots, x_n)$ çıktı büyüklük değerini veren bir algoritmayı temsil eder.

Model fonksiyonu, Y ölçülen büyüklük değeri ile ilgili ölçüm belirsizliğini hesaplamak için de kullanılır.

Ölçüm Modelinin Girdi Büyüklüğü

Bir ölçülenin ölçülen büyüklük değerini hesaplamak için, ölçülmesi gereken veya değeri başka yollardan elde edilebilen büyüklüktür.

Örnek: Belli bir sıcaklıktaki bir çelik çubuğun uzunluğunun ölçülen olması durumunda, gerçek sıcaklık, bu sıcaklıktaki uzunluk ve çubuğun sıcaklıkla doğrusal uzama katsayısı ölçüm modelinin girdi büyüklükleridir.

Bir ölçüm modelinin girdi büyüklüğü, sıklıkla bir ölçüm sisteminin çıktı büyüklüğüdür.

Gösterge değerleri, düzeltmeler ve etki büyüklükleri, bir ölçüm modelinin girdi büyüklükleri olabilir.

Ölçüm Modelinin Çıktı Büyüklüğü

Bir ölçüm modelinin girdi büyüklüklerinin değerleri kullanılarak ölçülen değerinin hesaplandığı büyüklüktür.

Belirsizliğin Olası Nedenleri

- Ölçülen değerin tanımındaki eksiklik,
- Ölçülen değerin tanımının gerçekleşmesindeki eksiklik,
- Ölçüm şartları/çevre koşullarındaki değişim,
- Analog cihazların okumasında personeldeki belli yönde eğilim,
- Ölçüm cihazlarının sonlu çözünürlüğü,
- Ölçüm standartlarının ve referans malzemelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi,
- Dış kaynaklardan elde edilen sabit parametrelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi,
- Ölçüm yöntemi ve işleminde yaklaşımlar veya ekstrapolasyonlar

Standart Ölçüm Belirsizliği

Standart sapma olarak ifade edilen ölçüm belirsizliğidir.

Standart Belirsizliğin A Tipi Değerlendirmesi

Belirli ölçüm koşulları altında elde edilen ölçülen büyüklük değerlerinin istatistiksel analizi ile ölçüm belirsizliği bileşeninin hesaplanmasıdır.

Farklı ölçüm koşulları için, ölçümün tekrarlanabilirliği koşulu, ölçümün ara kesinliği koşulu ve ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirliği koşulu kavramlarına bakınız.

A tipi değerlendirmelerde ortaya çıkan belirsizlik bileşenleri, istatistiksel standart sapmayı bulmaya yarayan bir dizi tekrar edilen gözlemden aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır;

$$\frac{s(x)}{\sqrt{n}} \qquad (5)$$

Eşitlik (5)'de;

s(x) : Deneysel standart sapma

n : Toplam gözlem (ölçüm) sayısı

A-tipi Belirsizlik Hesaplama Yönteminde Kullanılan Dağılımlar:

- Normal Dağılım
- Student Dağılımı

Normal Dağılım (Gauss Dağılım)

Aynı ölçülen büyüklüğe ait Tablo 11'de verilen n adet ölçümden oluşan bir seri için ölçüm sonuçların dağılımını karakterize eder.

Tablo 11. Ölçüm sonuçları

Ölçüm Sonucu	Sayı (n)	P=n/N
6,0	5	0,04
6,1	7	0,056
6,3	12	0,096
6,4	18	0,144
6,5	32	0,256
6,6	19	0,152
6,7	13	0,104
6,8	9	0,072
6,9	6	0,048
7,0	4	0,032
Toplam	**125**	
Ortalama	**6,5168**	

Ölçüm sonuçlarının dağılımı Eşitlik (6) ile tanımlanır.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \qquad (6)$$

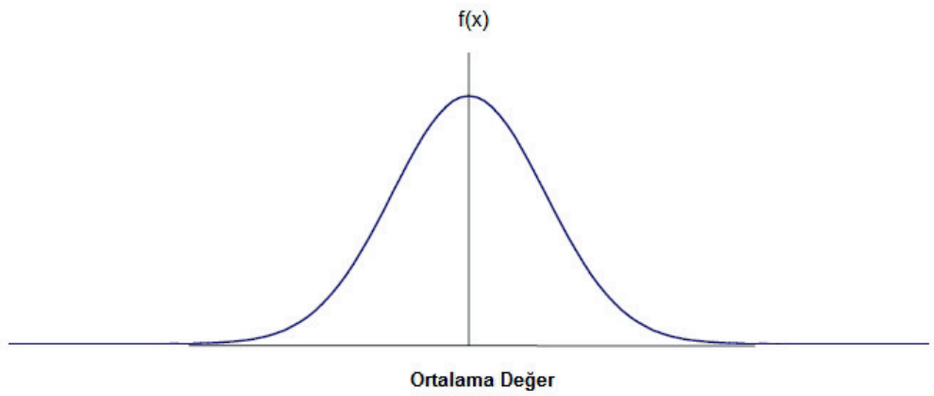
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}(x-\mu)^2}$$

x : Ölçüm sonucu

μ : Ölçülen büyüklüğün gerçek değeri

σ : Standart sapma



Şekil 16. Ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi

Student Dağılımı

Student dağılım çok yakından tanıdığımız normal dağılımın benzeri olup, ölçüm sayısının kısıtlı olduğu zaman (n<10) kullanılmaktadır. Student dağılımı ile normal dağılım arasında farkı dengelemek için Tablo 12'deki veriler kullanılır.

$$s_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(\bar{x}-x_i)^2}$$

$$s_x = t_{\gamma,p}\frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}}$$

p= % 68

γ= n-1 serbestlik derecesi

Standart Belirsizliğin B Tipi Değerlendirmesi

A tipi ölçüm belirsizliği hesabı dışında kalan yöntemler ile ölçüm belirsizliği bileşenlerinin hesaplanmasıdır.

B tipi değerlendirmede aşağıdaki bilgiler göz önünde bulundurulur:

- Daha önce yapılan ölçümlerde elde edilen veriler
- İlgili malzemeler ve kullanılan cihazlar konusundaki deneyim ve daha önce edinilmiş bilgiler
- Üretici firmanın belirttiği özellikler
- Kalibrasyon ve diğer sertifikalarda bulunan veriler
- Doğrulanmış bir ölçüm cihazının doğruluk sınıfı,
- El kitaplarında alınan referans verilere ilişkin belirsizlikler.

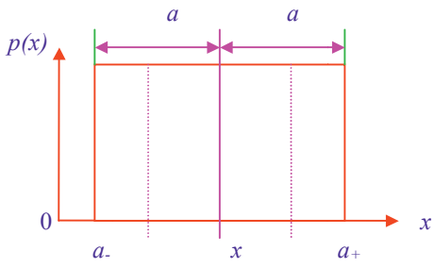
Tablo 12. Student dağılımı ile normal dağılım arasındaki farkı dengeleme faktörü

Serbestlik derecesi γ=n-1	*p* (Güvenilirlik düzeyi)					
	% 68,27	% 90	% 95	% 95,45	% 99	% 99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

B-tipi belirsizlik hesaplama yönteminde yaygın kullanılan dağılımlar:

a) Dikdörtgen Dağılım

Bu dağılım, bir büyüklüğün sadece değişim gösterebilecek aralık bilindiği takdirde kullanılır.

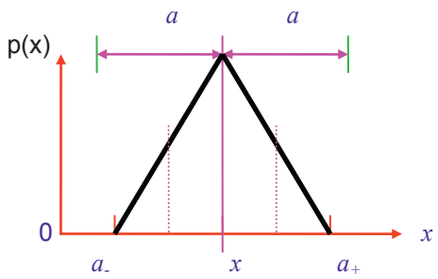


Simetrik olmadığı durum: $u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}}$

Simetrik olduğu durum: $u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

b) Üçgen Dağılım

Bu dağılım, bir büyüklüğün değişim gösterebilecek aralık ve eğilim bilindiği takdirde kullanılır.

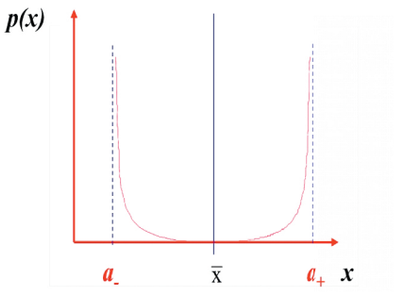


Simetrik olmadığı durum: $u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{6}}$

Simetrik olduğu durum: $u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}}$

c) U Tipi Dağılım

Bu dağılım, bir büyüklüğün değişim gösterebilecek aralık ve değerlerin sınırlara yakın bulunma olasılığının daha yüksek olduğu bilindiği takdirde kullanılır.



Simetrik olmadığı durum: $u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{2}}$

Simetrik olduğu durum: $u(x) = \frac{a}{\sqrt{2}}$

6.2. BİLEŞİK STANDART ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Bir ölçüm modelinin girdi büyüklükleriyle ilişkili bütün standart ölçüm belirsizliklerinin kullanımıyla elde edilen standart ölçüm belirsizliği olup, A tipi ve B tipi değerlendirme sonuçlarının uygun bir birleşiminden elde edilir. Bileşik belirsizlik, bir ölçümün pek çok sayıda başka değerlerden elde edilmiş sonucunun standart belirsizliği olup, bu değerlerdeki değişimin ölçüm sonucunu nasıl etkilediği göz önüne alınarak hesaplanan varyans ifadeleri toplamının pozitif karekökü ile ifade edilir. Buna göre birbirinden bağımsız girdi büyüklükleri için bileşik belirsizlik Eşitlik (7) ile belirlenir:

$$u(y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2\frac{u^2(x_i)}{k_i^{\,2}}} \qquad (7)$$

Eşitlik (7)'de,

$u_c(y)$: Y ölçüm büyüklüğünün bileşik belirsizliği

$u(x_i)$: x_i bileşenin belirsizliği

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$: Duyarlılık katsayısı (f fonksiyonunun x_i bileşenine göre türevi)

k_i : $u(x_i)$ belirsizliğinin olasılık dağılım fonksiyonundan gelen katsayı

6.3. GENİŞLETİLMİŞ ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Bileşik belirsizlik u(y) evrensel olarak ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamasına rağmen, bu değer ölçülen büyüklüğün dağılımı gösterdiğinde güvenilirlik düzeyi sadece % 68,27'dir. Diğer bir ifadeyle, aynı büyüklük herhangi bir şartlar altında ölçülürse sonuç % 68,27'lik olasılıkla $u_c(y)$ ile belirlenen aralıkta olacaktır. Pratikte ise endüstriyel uygulamalarda daha yüksek güvenilirlik düzeylerine gereksinim vardır. Bu durumlarda ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamak için genişletilmiş belirsizlik olarak adlandırılan diğer bir terim kullanılır. Genişletilmiş belirsizlik U, bileşik standart belirsizlik u(y) ile kapsam faktörü k'nın çarpımıdır:

$$U=k\times u(y) \qquad (8)$$

Faktör, bir ölçüm modelinin çıktı büyüklüklerinin olasılık dağılımlarının tipine ve seçilen kapsam olasılığına bağlıdır.

Bu tanımdaki "faktör" terimi kapsam faktörünü ifade eder.

Kapsam faktörünün değeri hedeflenen güvenilirlik düzeyine göre seçilir. Metrolojik uygulamalarda k=2,0 kullanılır. Bu değere karşılık gelen güvenilirlik düzeyi % 95,45'tir.

Güvenilirlik Düzeyi p (%)	Kapsam Faktörü k_p
68,27	1
90	1,645
95	1,960
99	2,576
100	3

İdeal Belirsizlik Hesaplama Yönteminin Özellikleri

Evrensellik: Yöntem her çeşit ölçüme ve her ölçüm için kullanılan her çeşit veriye uygulanabilir olmalıdır.

Kendi içinde tutarlılık: Ölçüm belirsizliği, belirsizliğe katkıda bulunan bileşenlerden, bileşenlerin gruplandırma şeklinden veya alt bileşenlere ayrılmış olmasından bağımsız olarak elde edilebilmelidir.

Taşınabilirlik: Bir ölçümün sonucunu ikinci bir ölçümde kullanmak gerektiğinde birinci ölçümün belirsizliği doğrudan ikinci ölçümde kullanılabilmelidir.

6.4. ÖLÇÜM SONUÇLARININ RAPORLANMASI

Kalibrasyon sertifikasında ölçüm sonucu eksiksiz olarak;

$y \pm U$

şeklinde verilmesi tavsiye edilir. Bu ifadede, y ölçüm sonuçlarının ortalaması, U ise genişletilmiş ölçüm belirsizliğidir.

Genelde, beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizlik değeri, bileşik standart ölçüm belirsizliğinin normal dağılım için yaklaşık %95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM [23] ve EA-4/02 [24] dokümanlarına uygun olarak belirlenmelidir.

Belirsizlik Hesaplarında İzlenecek Prosedür;

- Girdi büyüklüklerinin değerleri, çıktı büyüklüklerinin değerleri arasındaki matematiksel ilişki belirlenir:

  $$y = F(x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$$

- Ölçüm şartlarında ölçüm sonucunu etkileyen tüm faktörleri belirlenir.
- Tekrarlanan ölçümler sonucu elde edilen değerlerin belirsizliğini hesaplamak için önce deneysel standart sapma değeri,

  $$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(\bar{x} - x_i)^2}$$

  ve ortalamanın sapması değeri;

  $$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

  hesaplanır.
- Düzeltme ve düzeltilmemiş sistematik hatalara bağlı olan belirsizlik bileşenlerin listesi oluşturulur.
- Daha önce yapılmış olası dağılımlardan ve belirsizlik çalışmalarından yararlanılarak belirsizliğin sistematik bileşenleri belirlenir.

- Belirsizliğin her bir sistematik bileşeni için standart belirsizlik hesaplanır:

  dikdörtgen dağılım için $u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$

  normal dağılım için $u(x_i) = \frac{U(x_i)}{k}$

- Bileşik belirsizliğin değeri hesaplanır:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i)}$$

- Genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin değeri hesaplanır:

  $U = k \times u_c(y)$ Ölçüm sonucu, ölçülen değer ve hesaplanan belirsizlik değeri kullanarak raporlanır.

  Örneğin;

  m_s = (100,021 47 ± 0,000 35) g

  m_s =100,021 47 g , U = 0,35 mg

Nominal Değer	Ölçülen Değer	Belirsizlik
100 g	100,021 47 g	0,35 mg

“Beyan edilen genişletilmiş belirsizlik değeri, standart belirsizliğin normal dağılım için yaklaşık %95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.”

7. ÖLÇÜM ALANLARI

7.1. UZUNLUK ÖLÇÜMLERİ

7.1.1 UZUNLUK

7.1.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Uzunluk standartlarının oluşturulması ve uzunluk ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, bilim ve teknolojinin gelişim süreci içinde oldukça önemli bir yere sahip olmuştur. Bu süreçte amaç, teknolojinin ve sanayinin gereklerine paralel olarak ulusal ve uluslararası alanda kabul görmüş uzunluk birimlerinin, birincil seviye ölçüm sistemleri ve uzunluk standartları kullanılarak oluşturulabilmesidir.

Uzunluk biriminin oluşturulması ve buna paralel uzunluk ölçümleri geçmiş yüzyıllarda farklı şekillerde gerçekleştirilmiştir. İlk çağlarda, uzunluk birimleri için insan vücudu kullanılarak tanımlanırken, ilk olarak bir metre 1791 yılında Dünyanın Paris'ten geçen meridyeninin on milyonda biri olarak tanımlanmıştır. Daha sonraları bu tanıma bağlı kalarak, 1 metrelik bir bar, Platinyum malzemeden üretilmiş ve kullanılmıştır [25]. Bununla beraber, bu metal prototiplerin (bir anlamda mastar blokların) boylarının zaman içinde değişebileceği göz önünde bulundurularak, diğer SI birimlerinde olduğu gibi, uzunluk biriminin de değişmeyen bir niceliğe bağlanması gerekliliği düşünülmüştür.

Uzunluk biriminin tarihsel gelişim süreci içinde 1893 yılında, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nda (BIPM) çalışan Michelson ve Benoit, bir interferometre kullanarak metreyi Kadmiyum'dan yayılan kırmızı renkteki ışığın dalgaboyu cinsinden ölçtü. Bu gelişmeyi takiben metre, 1960 yılında, uyarılmış Krypton-86 gazından yayılan kırmızı-turuncu ışığın dalgaboyu cinsinden yeniden tanımlandı. Bu tanıma göre metre, Krypton-86 atomunun $2p_{10}$ ile $5d_5$ enerji seviyeleri arasındaki geçişe karşılık gelecek ışımasının vakumdaki 1 650 763,73 adet dalgaboyuna eşittir [26]. Bir anlamda belirlenen atomların tanımlanan enerji seviyeleri değişmez olduğundan, bu seviyeye karşılık gelecek vakumdaki dalgaboyu değişmez olmaktadır.

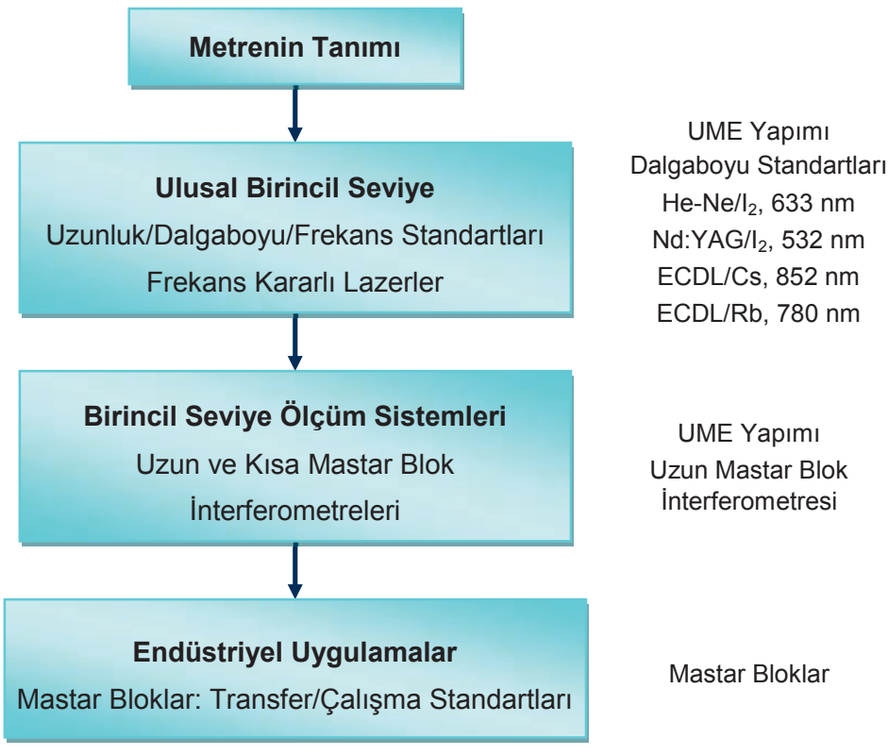
Böylece seçilen atomlardan yayınlanan ışınların sabit olan vakum dalgaboyu değerleri kullanılarak, 1 metre içinde kaç tane dalgaboyu değeri olduğu sayılarak 1 metrenin tanımına gidildi. Burada amaç, uzunluk birimini (örneğin, 1 metrelik bir mastar bloğun boyunu) değişmeyen sabit bir değere, yani ışığın dalgaboyuna bağlı kılmak, diğer bir deyişle de ölçmektir. Çünkü yüzyıllar geçse dahi metal prototiplerin boyları değişebilecekken, seçilen atoma bağlı olarak bu atomdan yayımlanan ışığın vakumdaki dalga boyu asla değişmeyecektir. Diğer bir deyişle, aynı şartların sağlanması ile ışığın dalgaboyu, istenen hassasiyette ve doğrulukta tekrar elde edilebilecek ve buradan da uzunluk tanımına gidilebilecektir.

Bu şekilde bir arayış ve tanımlama isteği ile 1970'li yıllarda He-Ne lazerinin keşfi metrenin tanımının tekrar şekillenmesini sağladı. Bunun nedeni, kararlı lazerlerin Krypton kırmızı-turuncu ışığından daha kararlı olduğunun, yani daha hassas derecelerde değişmez bir dalgaboyu değerine sahip olduğunun gözlenmesiydi. Bu gelişmelerden sonra, 1975 yılında ışığın vakum ortamındaki hızının 299 792 458 m/s olarak kabul görmesi ile de 1983 yılında Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) üyeleri, dalgaboyunun doğrudan kullanımı yerine, ölçüm sıralamasında bir değişim yapmaya karar verdiler [25][27]. Belirtilen değişime göre metre türetilerek ve aşağıdaki şekilde tanımlandı;

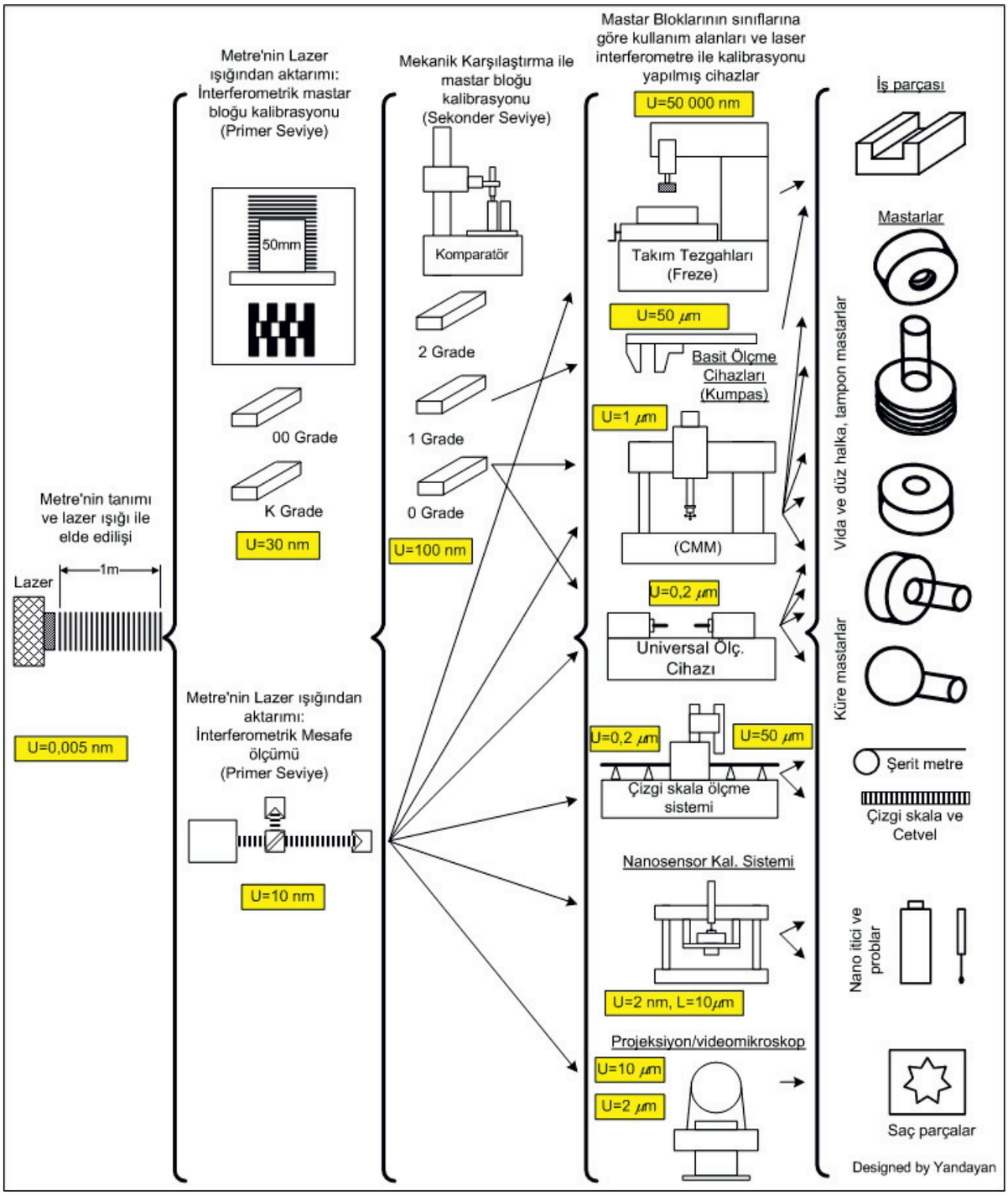
"**1 metre, 1/299 792 458 saniyelik bir zaman aralığında, ışığın boşlukta (vakumda) kat ettiği mesafenin uzunluğudur.**"

Sonuç olarak “metre”, ışığın hızına bağlı olarak tanımlanabilmekte ve günümüzde de artık bu tanım kullanılmaktadır. Burada ışığın hızı evrensel bir sabit olarak kabul edilmekte, mesafe ve uzunluk ölçümleri yine ışığın bilinen ve kabul gören dalgaboyları cinsinden ölçülebilmektedir. Bu ölçüm yöntemlerinden biri de interferometrelerdir ve metin içinde detaylı olarak anlatılacaktır. Sonuçta metre, dönemin ihtiyaçları paralelinde, bilim ve teknolojinin sınırlarını zorlayarak tanımlanmıştır.

Uzunluk birimi metrenin tanımlanmasında ışık, bir anlamda da tek dalgaboylu ve eş fazlı bir ışık kaynağı olan lazerler kullanıldı. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, metrenin tanımında kullanılan lazerlerin eğitim laboratuvarlarında ya da günlük hayatta kullanılan lazerlerden biraz daha farklı lazerler olduğudur. Şöyle ki, dünya çapındaki ulusal metroloji enstitülerinin Uzunluk Laboratuvarlarına baktığımızda, bu lazerlerin dalgaboylarının özel ölçüm sistemleri ile 0,000 000 000 000 000 02 metre doğrulukla bilinebildiğini görmekteyiz. Bu durumda, bu kadar hassas bilinen dalgaboylarına sahip lazerler, ulusal metroloji enstitülerinde dalgaboyu standardı, ışık hızının ışığın frekansı ve dalgaboyunun çarpımına eşit olduğunu göz önünde bulundurursak, bu lazerler bir anlamda frekans standardı, daha genel tanımla da uzunluk standardı olarak düşünülüp kabul edilmektedir. Bu önemli bir noktadır; böylece dünyanın herhangi bir yerindeki bir ulusal metroloji enstitüsünde gerekli standartların sağlanması ile uzunluk standardının tekrar oluşturulabilirliği aynı doğrulukla sağlanmış olabilmektedir. Daha sonrasında bu özel lazerlerin kullanılması ile de endüstrinin ihtiyaçlarına paralel olarak uzunluk ve mesafe ölçümlerine geçiş yapılabilmektedir.



Şekil 17. Metrenin tanımı ile endüstriyel uygulamalar arasındaki izlenebilirliği özetleyen akış diyagramı

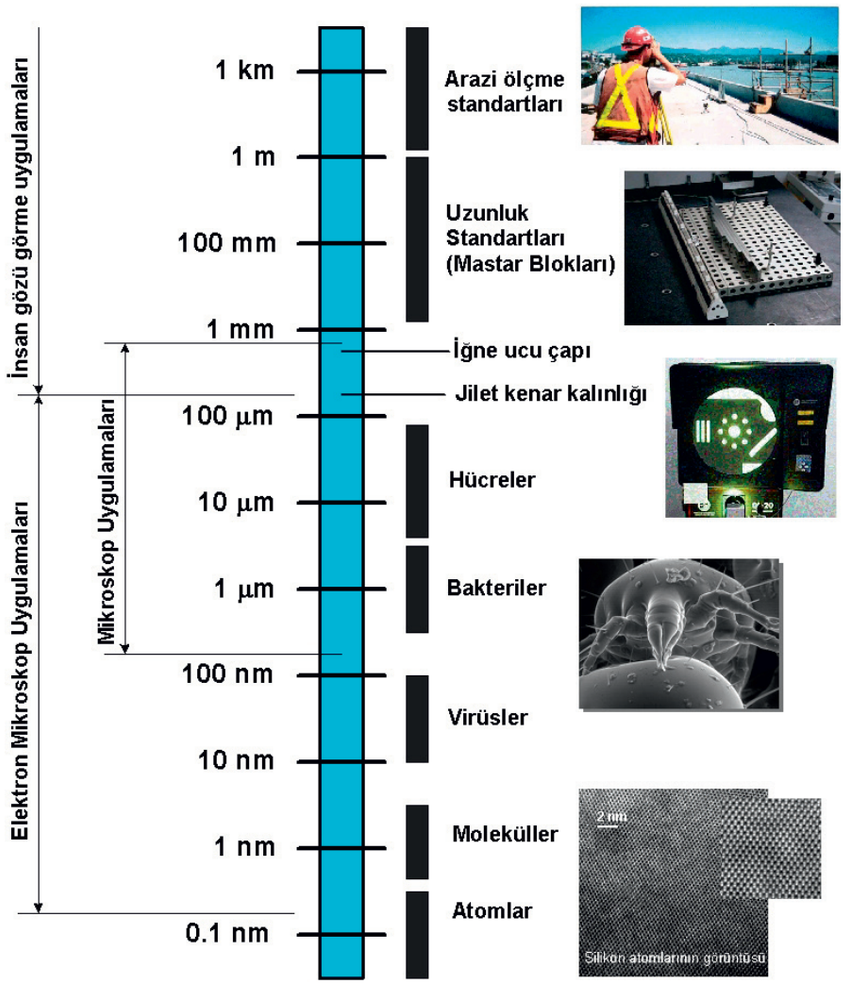


Şekil 18. Uzunluk ölçümleri izlenebilirlik zinciri (% 95, k=2)

7.1.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Uzunluk ve boyutsal metrolojisinin temel çalışma alanları: Frekansı kararlı lazerler ve frekans ölçümleri, mastar blokları ve interferometrik ölçümler, açı ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, nanometroloji, çap ve form (geometrik) ölçümleri, uzun mesafe ölçümleri, endüstriyel ölçümler ve optik takımlama ve üç boyutlu (CMM metrolojisi) ölçümlerdir.

Yukarıda adı geçen boyutsal metrolojisi uygulamalarının, ölçme skalası üzerinde örnekler ile anlatımı Şekil 19'da verilmektedir.



Şekil 19. Ölçüm skalası üzerinde boyutsal metrolojisi uygulama alanları

Frekansı Kararlı Lazerler ve Comb Sistemi ile Frekans Ölçümleri

Lazer – Frekanslı Kararlı Elektromanyetik Dalga Kaynağı

1954 yılında kuantum elektroniğinin doğuşu ile başlayan çalışmalar 1958 yılında spektrumun mikrodalga ve optik bölgesinde eş fazlı ışınımın oluşumu için negatif soğurum elde edilmesini sağlayarak ve 1960 yılında optik frekanslarda ilk kuantum osilatörünün üretimi ile tamamlandı. Bu kuantum osilatörü T. H. Maiman tarafından üretilen ruby lazeridir [28]. İki seviyeli kuantum geçişlerde ilk lazerlerin yapılması 1963 yılında Sovyetler Birliğinde, 1964 yılında ABD'de bağımsız olarak gerçekleştirilerek bilim ve teknolojide yeni bir çığır açtı. Bu dönem içerisinde

birçok bilim adamının çalışmaları, günümüzdeki lazer uygulamalarının teorik ve uygulamalı temellerini attı. 1964 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden (MIT) C. H. Townes ve Moskova Lebedev Fizik Enstitüsü'nden N. G. Basov ve A. M. Prokhorov'ın mazer-lazer temelli osilatörlerin ve yükselticilerin yapımını sağlayan kuantum elektronikteki temel çalışmalarının Nobel Fizik Ödülüne layık görülmesi, bu çalışmaların bilim ve teknolojiye önemli katkılarının göstergesidir [29]

Günümüzde geniş spektral (0,1 μm – 10 μm) ve güç (1 μW – 1 MW) aralığında kesintisiz (CW) ve darbeli (1 ms – 1 fs) çok sayıda lazerler geliştirilmiştir. Bu çeşitli özelliklere sahip lazerler, tıp alanında, spektroskopide, optik saat ve optik haberleşme alanlarında, kesme ve kaynak işlemlerinde, askeri alanda ise lazer tabanlı silah sistemleri olarak yaygın uygulama alanı bulmuştur.

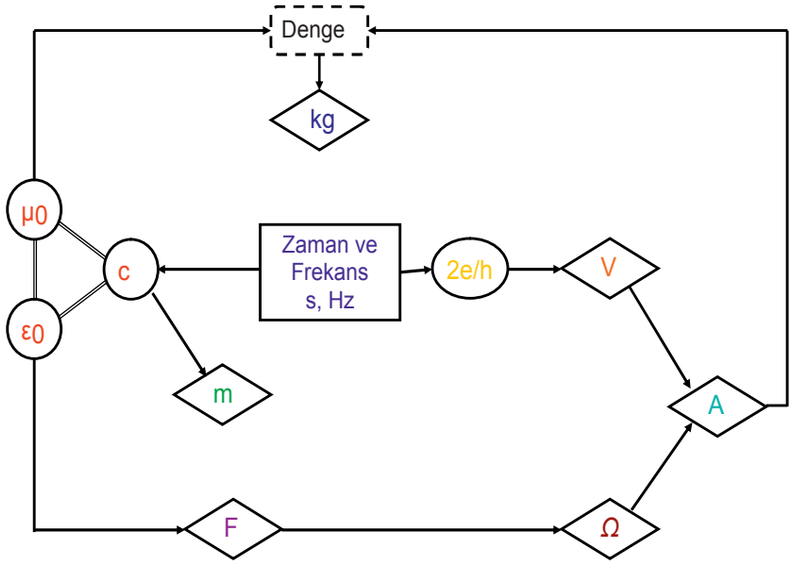
Lazerlerin uzunluk standartları olarak uygulamalarında lazerin ince spektral çizgiye sahip ve frekansı kararlı hale getirilmiş elektromanyetik dalga özelliği ön plana çıkararak önem taşır. Başka bir ifadeyle, uzunluk metrolojisinde "güçlü lazer" konusu değil "frekansı kararlı" lazer konusu önem taşımaktadır.

Günümüzde lazerlerin ürettikleri elektromanyetik ışınımının frekansındaki veya periyodundaki günlük değişimler $\Delta\omega/\omega=\Delta T/T=10^{-14}$ değerlerine kadar ulaşılabilir. Görünür bölgede ışınım frekansı yaklaşık 500 THz'dir (500 Trilyon Herz). Başka bir değişle lazer ışıması 1 saniyede 500 Trilyon salınım yapar. 1 saniye içindeki 500 trilyon salınım sayısı sabit kalmaz ve yaklaşık 5 salınım az veya çok olabilir. Bu durum lazerin 1 saniye süre içindeki frekans veya periyot kararlılığını (5 salınım/500 trilyon salınım) göstermektedir. Lazerin bu özelliği, yani sabit frekanslı elektromanyetik dalga kaynağı özelliği, lazerlerin birçok uygulamalarda, örneğin, optik saat ve uzunluk ölçümleri gibi uygulamalarındaki önemini her geçen gün artırır. Lazer ışımasının $\Delta\omega/\omega=\Delta T/T=10^{-14}$ seviyesinde frekans kararlılığının teknolojik olarak ulaşılan çok iyi bir değer olduğunu göstermek amacıyla burada iki örnek sunabiliriz. Birinci örnek, doğa olayıdır. Bilindiği gibi Dünya gezegeni Güneş etrafında 1 yıllık periyotla, kendi ekseni etrafında ise 1 günlük periyotla döner. Dünyamızın bu periyodik hareket süreleri de sabit kalmayıp, yıllık $\Delta T=T\times10^{-9}$ ve günlük ise $\Delta T=T\times10^{-8}$ kadar değişim gösterir. Dolayısıyla Dünya gezegeninin periyodik hareket kararlılığı 10^{-8} - 10^{-9} civarındadır. İkinci örnek olarak ise RF sinyal jeneratörü veya kuvars osilatör temelli saatleri sunabiliriz. Günümüzde üretilen en pahalı RF sinyal jeneratörü veya kuvars osilatör temelli saatlerin 1 günlük kararlılıkları 10^{-9} - 10^{-10} civarındadır.

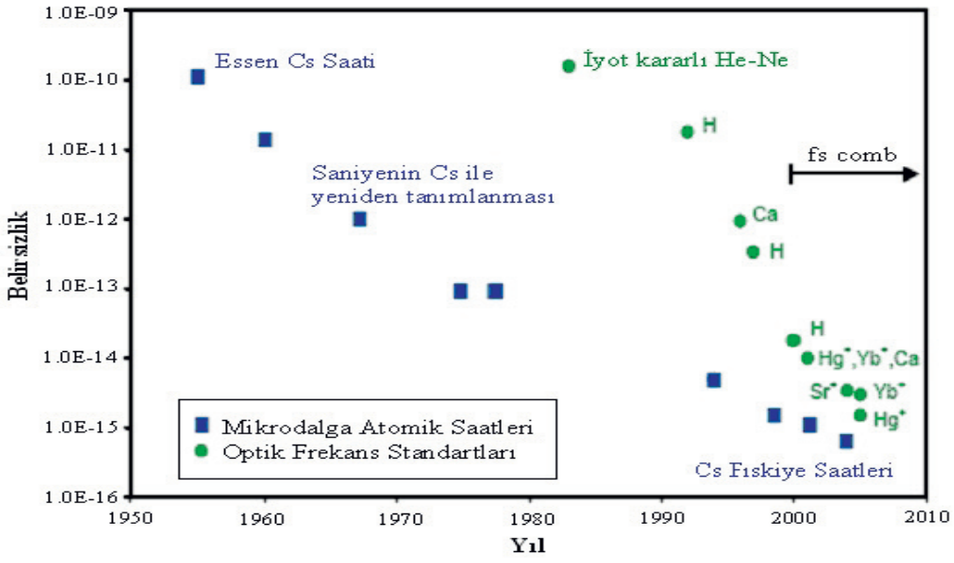
Temel SI biriminden biri olan zaman (frekans) birimi saniye (Hz), günümüzde 10^{-13} - 10^{-15} doğrulukla en doğru ölçülebilen birimdir. Bu nedenle, diğer birimlerin ölçüm doğruluklarını artırmak için zaman ve frekans ölçümlerinden yararlanılır (Şekil 20). Diğer taraftan, gelişen teknolojiyle birlikte doğru zaman bilgisine olan ihtiyacı karşılamak, havacılık, uzay ve savunma sistemlerinde özel önem taşıyan zaman koruma sistemlerini iyileştirmek için, teknolojisi gelişmiş ülkelerde zaman ve frekans standartları sistemlerini kurarak, geliştirilmesi için yapılan çalışmaları desteklemektedirler.

Yüksek frekans doğruluğuna (10^{-11} - 10^{-15}) sahip elektromanyetik dalgaların üretilmesi ve bu doğrulukla da ölçülebilmesinin bilim ve teknolojide büyük önemi vardır. Her ne kadar günümüzde en yüksek doğrulukla üretilebilen ve ölçülebilen birim, zaman ve frekans olsa da hem bu birimin hassasiyetine olan ihtiyaç, hem de bu birimden türetilen diğer birimlerin belirsizliğinin azalması frekans ölçümlerine olan ihtiyacı her gecen gün artırır. Bu ihtiyaç doğrultusunda hem mikrodalga hem de optik frekans standartları ile ilgili çalışmalar aktif bir şekilde devam etmekte olup 10^{-15} mertebesinde kararlılığa ulaşılır. Özetleyici bilgi Şekil 21'de verilmiştir [30]. Uzun yıllardan beri lazerlerin geliştirilmesine rağmen frekansı kilitlenmemiş lazerlerin frekans kararlılıkları ve frekans doğrulukları 10^{-7} - 10^{-9} civarındadır. Ancak fiziksel birimlerin yüksek doğrulukla üretilebilmesi ve ölçülmesi, sabitlerin yüksek doğrulukla bilinmesine

olan ihtiyaç, spektroskopi uygulamaları, atomların lazer ile soğutulması ve tuzaklanması, gravitasyon dalgalarının algılanmasına yönelik çalışmalar frekansı daha çok kararlı lazerler gerektirir. Ölçüm bilimde ise uzunluk ve yer değiştirme ölçümleri, zaman ve frekans standartları, haberleşme ve konumlama gibi teknolojik alanlardaki uygulamalar, hem lazerlerin frekans doğruluk ve kararlılığının 10^{-7} - 10^{-9} den 10^{-11} - 10^{-15} mertebelerine çıkartılmasına hem de onların mutlak frekans değerlerinin bu seviyelerde izlenebilir bir şekilde ölçülmesine ihtiyacı her geçen gün artırır.



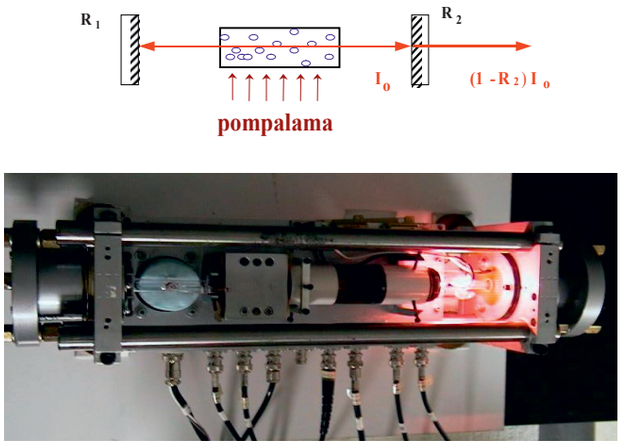
Şekil 20. SI birimlerinin zaman birimi saniye ile bağlantısı ve türetilmesi



Şekil 21. Yıllara göre mikrodalga ve optik standartlardaki gelişmeler

Lazerlerin Frekans Kararlılığı

Yukarıda da sunulduğu gibi uzunluk metrolojisi uygulamalarında frekansı atom veya moleküllerin enerji geçişlerine kilitlenmiş ve frekansı Cs atomik saatine izlenebilir bir şekilde ölçülmüş kararlı lazer kaynaklarına ihtiyaç vardır. Aktif ortam, iki aynadan oluşan optik rezonatör, aktif ortamdaki atom veya molekül temelli kuantum osilatörlerin üst seviyeye pompalanması ve ışımanın güçlendirilmesi ile elde edilen lazerin blok şeması ve bu ilkeler doğrultusunda TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) üretilen ve spektrumun kırmızı ışınım bölgesinde çalışan ve $^{127}I_2$ moleküllerinin enerji geçişlerine kilitlenebilen He-Ne/$^{127}I_2$ lazerinin görüntüsü Şekil 22'de verilmiştir.

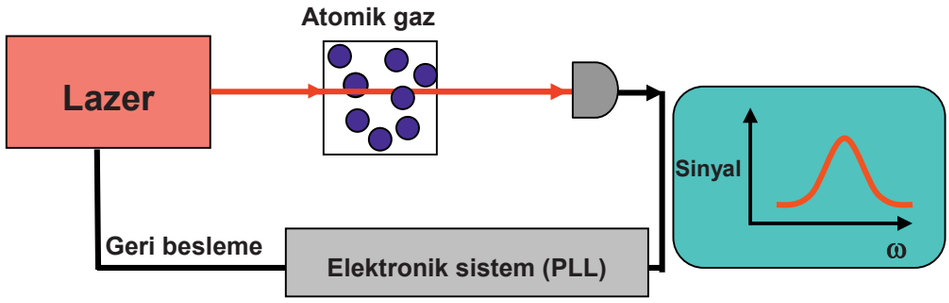


Şekil 22. Lazer rezonatörünün blok şeması ve He-Ne/I_2 lazerinin görüntüsü

Aktif ortam, örneğin He-Ne tüpünden ve bu tüpü arasına alan iki aynalı rezonatörden oluşan serbest çalışan lazerlerde ışımanın frekans değişimi $\Delta\omega/\omega$ genel olarak aynalar arası L mesafesinin ΔL değişimi ile belirlenir $(\Delta\omega/\omega) \sim (\Delta L/L)$. Ancak frekans değişimini, ayrıca aktif ortamdaki ve aynalar arasındaki kırınım indisi değişimi de etkiler. Laboratuvar ortamlarındaki sıcaklık ve basınç değişimleri, akustik dalgalar ve lazer güç kaynağındaki dalgalanmalar serbest çalışan lazer frekansını $(\Delta\omega/\omega) \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ mertebesinde etkileyebilir. Ortamdaki sıcaklık değişimlerinin lazer frekansına etkisinin azaltılması için lazer tasarımlarının çoğunda rezonatör malzemesi olarak invar seçilir. Hatta bazı durumlarda kuvars malzemeler bile kullanılır. Genel olarak kullanılan invar malzemelerin sıcaklık genişleme katsayısı $\alpha \approx 10^{-6}$ C^{-1} olduğu varsayılırsa, Δt=0,1 ºC sıcaklık değişimi ile 1 m boyutundaki lazerin rezonatörünün uzunluğu $\Delta L/L \approx \alpha \times \Delta t \approx 10^{-7}$ civarında değişmektedir. Bu değişim lazer frekansında 60 MHz ve lazer frekans kararlılığında da $(\Delta\omega/\omega) \approx 10^{-7}$ mertebesinde değişime sebep olmaktadır. Bu değişimin azaltılması için lazer aynaları piyezoseramikler (PZT) üzerine monte edilirler. PZT'lere değişimleri telafi etmek için gerekli gerilimler verilerek bu değişimleri $(\Delta\omega/\omega) \approx 10^{-14}$ mertebelerine kadar indirmek mümkündür. Bu yüksek frekans kararlılığı lazer frekansının atom ve moleküllerin enerji geçişlerine kilitlenmesi ile gerçekleşir. Frekansı ω ve enerjisi $h\omega$ olan lazer ışıması E_1 ve E_2 enerji seviyelerine sahip atomik gaz içerisinden geçerek fotodiyot ile algılandığını varsayalım (Şekil 23).

Lazer frekansı atomların enerji geçişlerine ayarlandığında ($h\omega = E_2 - E_1$) temel E_1 seviyesindeki atomların bir kısmı lazer ışımasını soğurarak E_2 üst enerji seviyesine çıkar ve daha sonra da soğurduğu fotonları rastgele farklı yönlere gönderirler. Böylelikle lazer frekansının değişimi ile fotodiyotda, tepe frekansı atomların geçişlerine denk gelen rezonans sinyal gözlenir. Bu

rezonans sinyal faz kilitleme döngülü (PLL) elektronik sistemlerin aracılığıyla lazer frekansının atomların enerji geçişinde sabitlenmesinde, başka değişle lazer rezonatör boyunun atomların enerji geçişlerine kilitlenmesinde kullanılır. Örneğin, sıcaklığın değişimi ile aynalar arası mesafe ve Dolayısıyla lazer frekansı artarsa elektronik sistem aynaların montaj edildiği PZT'ye geri besleme gerilimi göndererek aynayı ters yönde hareket ettirir ve lazerin frekansını atomların enerji geçişinde sabitleyerek kararlı hale getirir. Lazer frekansının atomik ve moleküler geçişlerde kararlılığı elektronik sistemin parametrelerinin yanı sıra kullanılan atomik gazın parametrelerine de bağlıdır. Lazer – atomik gaz etkileşimi sırasında soğurum rezonanslarının çizgi kalınlıkları lazer frekans kararlılıklarını doğrudan etkilemektedir. Lazer frekansı soğurum rezonansının tepe noktasına denk gelen frekansa kilitlendiği zaman tepe noktasının yakın etrafında salınım yapar. Bu salınım genliği geri besleme için kullanılan elektronik sistemlerin parametrelerine de bağlıdır. En iyi parametrelere sahip elektronik sistemler ile frekans stabilizasyonu sırasında elde edilen frekans kararlılıkları veya lazer frekans salınımları rezonans soğurum spektrumunun çizgi kalınlığının 1000 kat altında olabilir. Bu sebepten dolayı da çeşitli dalga boyundaki lazerler ile etkileşime girebilecek gazlar seçilir. Bunun nedeni, lazer – atom etkileşiminin gerçekleşmesi için lazer enerjisine denk gelen uygun enerji geçişlerine sahip atomik veya moleküler gazların bulunması gereklidir.



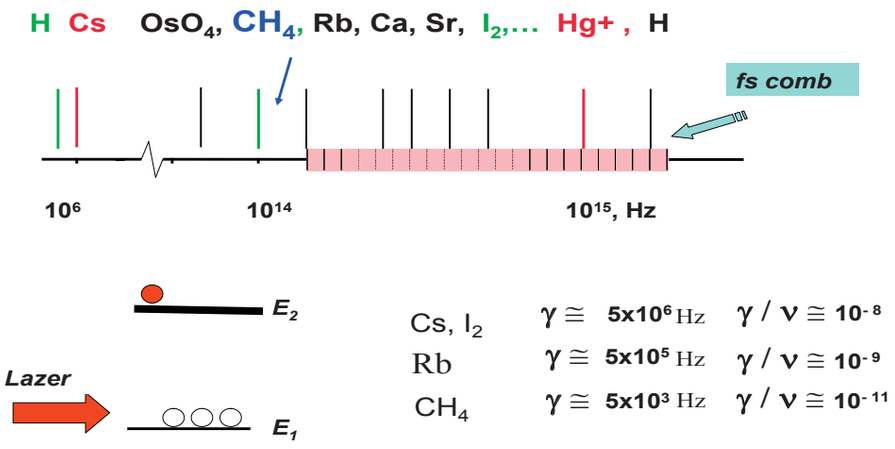
Şekil 23. Lazer frekansının, atomların enerji geçişlerine kilitlenmesi deneyinin blok şeması

Örneğin, 633 nm dalga boyundaki He-Ne lazerinin frekansı $^{127}I_2$ moleküllerinin enerji geçişlerine, 780 nm ve 852 dalgaboyundaki dış kaviteli diyot lazerlerinin frekansları ise ^{85}Rb ve ^{133}Cs atomlarının D_2 enerji geçişlerine denk gelmektedir. Bu atomik veya moleküler gazların üst enerji geçişlerindeki doğal çizgi kalınlığı γ ve bu çizgi kalınlığının lazer frekansına oranı, lazer frekans kilitlenmesinde önemli faktördür. Bu oran Cs atomlarının D_2 geçişinde 10^{-8} civarında iken Rb atomların S-D iki foton geçişinde 10^{-9} mertebesindedir (Şekil 24). Lazerin bu geçişlerde frekans kilitlenme kararlılığı σ atomik rezonansın kalite faktörüne (γ/ν), fotodiyotda gözlenen soğurum rezonansının sinyal ve gürültü oranına (S/N) ve ortalama ölçüm zamanına τ bağlıdır [31]:

$$\sigma \sim \frac{\gamma}{\nu} \times \frac{N}{S} \times \frac{1}{\tau} \qquad (9)$$

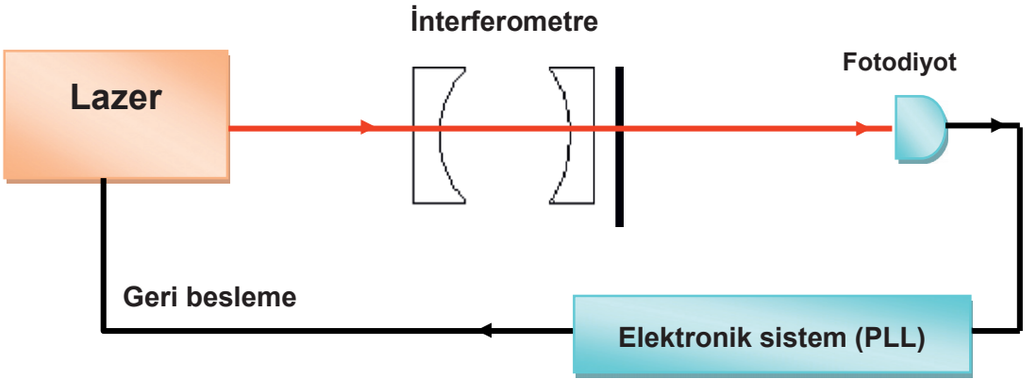
Dolayısıyla mevcut lazer için ilk önce uygun enerji geçişlere sahip atomlar veya moleküller bulunur. Bulunan atomlar veya moleküllerden hangisinin üst enerji seviyesi ince ise ve lazer ile etkileşim sırasında en yüksek rezonans sinyal elde edilebilirse o gaz lazer frekans kilitlemesinde kullanılır. Sonuç olarak ince ve yüksek genlikli atomik rezonans kullanıldığında ve lazer frekansı bu rezonansların tepe noktasına kilitlendiğinde daha kararlı lazer elde edilir. Lazer frekansı kilitli durumda iken rezonansın tepe noktası yakın çevresinde az da olsa salınım yaptığı için kararlılık belirli ortalama zaman içinde ölçülür. Bu salınım tepe noktası etrafında dengeli devam ederse ortalama zamanın artması ile daha iyi kararlılık değeri elde edilir. Ayrıca bu salınım kararlılık analizlerinde beyaz gürültü olarak bilinir. Bazı durumlarda ise beyaz gürültü olarak adlandırılan bu hızlı salınımların yanı sıra daha uzun süreli veya periyotlu salınımlar da olabilir. Bu durumu

uzun süreli salınımların üzerine eklenmiş kısa süreli salınımlar olarak tarif edebiliriz. Uzun süreli salınımlar literatürde titrek (flicker) gürültü olarak bilinir. Maalesef laboratuvar ortamlarındaki sıcaklık değişimlerinden ve elektronik sistemlerdeki değişimlerden dolayı kısa ve uzun süreli frekans salınımlarının yanı sıra lazer frekansında bir tarafa doğru kayma da olabilir. Bu üç olay bir araya geldiğinde ortalama zamanının artması ile ilk başta kararlılık iyileşir, sonraki zaman dilimlerinde ise uzun süreli salınımlardan dolayı kararlılık değişmez, ancak frekans kaymalarının artması ile lazer kararlılığı kötüleşir.



Şekil 24. Lazer frekanslarına uygun gelen atom ve molekülerin rezonans kalite faktörleri.

Bazı durumlarda rezonans kalitesini artırmak amacıyla lazer ışıması özel tasarlanmış Fabry-Perot interferometresi rezonanslarına kilitlenmektedir (Şekil 25). Sıcaklık ve basınç kontrollü interferometrelerde rezonans çizgi kalınlıkları CH_4 moleküllerin geçişleri kadar 1 kHz değerlerine kadar indirilebilir. Bu interferometrelerin kullanımı ile lazer frekansının kısa dönemdeki kararlılığı ciddi bir şekilde iyileştirilebilse de ($< 10^{-12}$), uzun zaman aralığında sıcaklık değişimleri dezavantaj olmaktadır. Lazer atom veya moleküllerin enerji geçişlerine kilitlendiği zaman üretmiş olduğu elektromanyetik ışımanın tanımlanmış ve kolayca dış etkenlerden etkilenmeyen frekansı vardır.

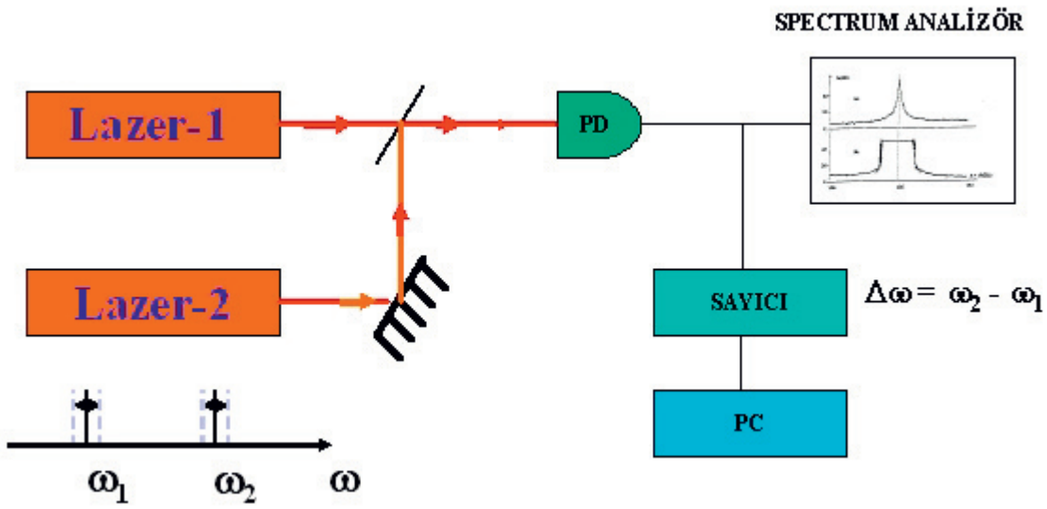


Şekil 25. Lazer frekansının, interferometre boyutuna kilitlenmesi deneyinin blok şeması

Lazer Frekans Ölçümü ve İzlenebilirlik Zinciri

İlk lazerlerin gerçekleştirilmesinden bugüne kadar frekansının atom ve moleküllerin enerji geçişlerine kilitlenmesi çalışmaları hızla yayılmış ve 60'lı yılların sonunda 10^{-11} - 10^{-12} mertebelerine ulaşıldı. Ancak iki seviyeli kuantum geçişleri ile belirlenmiş lazer frekansının RF ve mikrodalgadan farklı olarak çok yüksek değerlerde (500 000 000 000 000 Hz) olması, lazerlerin mutlak frekans ölçümünü çok ciddi, zor ve pahalı bir deney olarak bilim adamlarının karşısına çıkardı. 1972 – 1999 yılları arasında lazer frekans ölçümleri dünyada birkaç laboratuvarda kurulan RF-Optik frekans zincirinde yapılabiliyordu. Bu laboratuvarlar SSCB, Almanya, İngiltere ve ABD Metroloji Enstitüleri'nde kurulabilmiştir. Bu laboratuvarlarda bile kısıtlı miktarda lazer frekansı ölçülebilirdi. Radyofizikte DC – 100 GHz frekans ölçümleri kolayca ölçülebilmesine rağmen, kuantum elektronikte 500 THz frekans ölçümü yeni teknikler gerektirdi. RF-Optik frekans zincirinde optik frekans ölçümlerinde atomik saatler, 5-6 lazer, 5-6 klistron ve bu kaynakları bir birine bağlayan çeşitli metal-metal kontaktları ve Shottky diyotlar kullanılıyordu [32]. Bu yöntemler ile 10^{-13} - 10^{-14} frekans belirsizliğine sahip Cs ve H frekans standartlarının referans RF sinyalleri (ω_{RF}) optik bölgeye taşınarak lazer frekansı ölçümü gerçekleştirilirdi:

$$\omega_{Lazer} = n \times \omega_{RF} + \Delta\omega_{beat} \qquad (10)$$

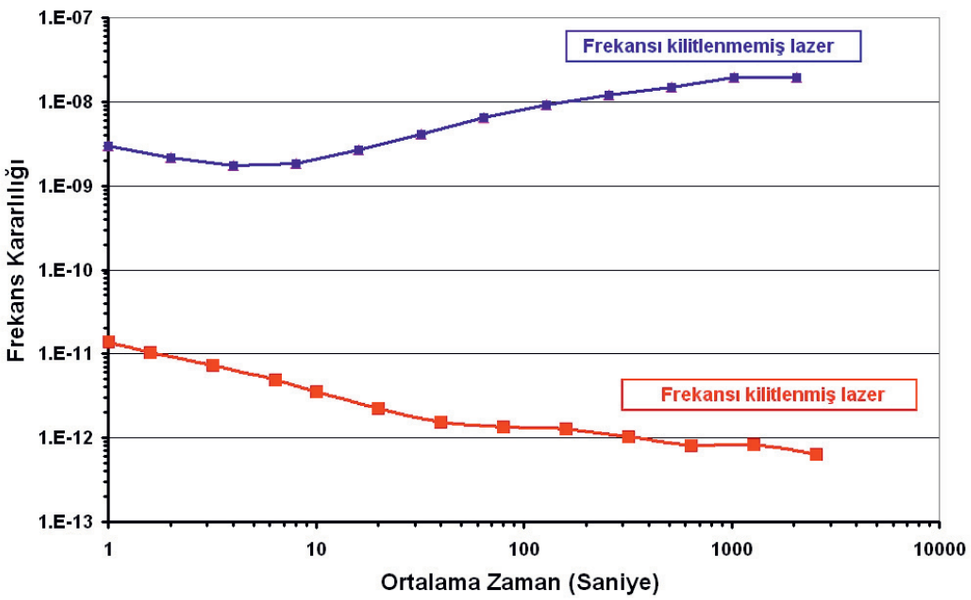


Şekil 26. İki lazer frekans farkının "beat" deneyi tekniği ile ölçülmesi

Burada n, tam sayı ve $\Delta\omega_{beat}$ ise RF bölgesinde ölçülen değerdir. Lazer frekansını ölçmek zor olduğu için çok hassas metroloji deneylerinde, örneğin farklı ülkelerde yapılan lazer ile uzunluk ölçümleri deneylerinde, karşılaştırma deneyleri uygulanırdı ve hatta şimdi de kısmi olarak devam etmektedir. 633 nm dalgaboyunda çalışan ve Paris'te bulunan Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) tarafından geliştirilen lazerin frekansı RF-Optik frekans zincirinde ölçülmüştür. Bu ölçümler sırasında lazerin gücü, lazer frekans kilitlemesinde kullanılan $^{127}I_2$ gazının basıncı ve lazer frekans modülasyonu belirli değerlere ayarlanmıştır. Diğer ülkelerde ve bizim ülkemizde, TÜBİTAK UME'de geliştirilen He-Ne/I_2 lazerinin parametreleri aynı değerlere ayarlanır. Daha sonra ulusal standartlar BIPM'e taşınarak uluslararası standart ile "beat" tekniği ile karşılaştırılır. Bu deney düzeneğinin blok şeması Şekil 26'da verilmiştir. Her iki frekansı kilitli lazer ışıması hızlı fotodiyot üzerine düşürülerek "beat" sinyali spektrum analizör ile gözlenir ve iki lazer arasındaki frekans farkı bilgisayar kontrollü sayıcı ile ölçülerek Allan Variance istatistiği ile analiz edilir. Belirli bir t zaman süresi için değişen veya salınım gösteren herhangi bir fiziksel ölçüm değeri veya bizim örnekteki iki lazer frekansı arasındaki $\Delta\omega$ farkı, Allan Variance istatistiği ile analiz edildiğinde iki yakın ölçüm arasındaki fark önem taşır. Oysa standart sapma istatistiğinde ölçümlerin ortalama değerden farkı analiz edilmektedir. Ancak Allan Variance

istatistiğinin standart sapma istatistiğinden aşağıdaki önemli avantajları bu istatistiğin kuantum osilatör frekans analizlerine uygulanmasını sağlar. Eğer ortalama zaman arttıkça frekans kararlılığı değeri (σ) azalıyorsa, salınım beyaz gürültü gibi davranır. Belirli ortalama zaman içinde kararlılık değişmiyorsa, titrek gurultu ön plana çıkar. Kararlılık değeri σ, ortalama zamana bağlı olarak artıyorsa, frekans farkı zaman içinde kaymakta ve frekans sabit değer etrafında salınım göstermemektedir.

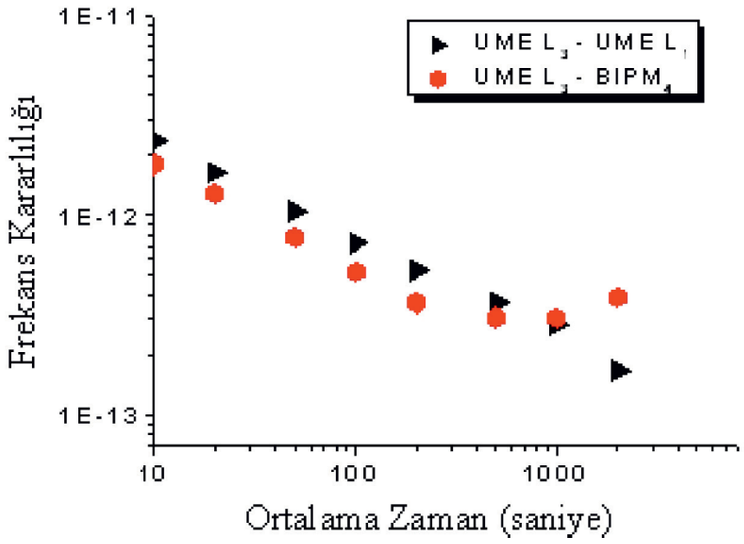
TÜBİTAK UME'de kurulan iki Nd:YAG/I_2 lazerinin frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi Şekil 27'de verilmiştir. Mavi renkli grafik her iki lazer frekansı $^{127}I_2$ moleküllerin enerji geçişlerine kilitlenmediği durumda, kırmızı grafik ise frekans kilitlenmesi sağlandığı durumda elde edilmiştir. Şekilden göründüğü gibi frekansı kilitlenmemiş lazerin kararlılığı 10^{-9} - 10^{-7} arasında değişirken, frekans kilitlenmesi sağlandığında rezonatör boyundaki ve dolayısıyla lazer frekansındaki değişimler elektronik sistem ile telafi edilmiş ve frekans kararlılığı 10^{-11} - 10^{-13} değerlerine kadar iyileştirilmiştir. Beklendiği gibi frekansı kilitlenmemiş lazerlerde sıcaklık değişimlerinden dolayı beyaz, titrek gürültü ve özellikle frekans kayması gözlenirken, kararlı lazerlerde daha çok beyaz gürültü ve bir miktar titrek gürültü gözükmektedir [33].



Şekil 27. İki Nd:YAG/I_2 lazerinin frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi

Şekil 28'de TÜBİTAK UME ulusal uzunluk standardı olan He-Ne/I_2 lazerinin uluslararası standart olan BIPM He-Ne/I_2 lazeri ile karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Görüldüğü gibi iki TÜBİTAK UME lazeri geniş zaman aralığında ortalama frekans değeri etrafında beyaz gürültü salınımı yapmış ve frekans kayması göstermemiştir. BIPM lazeri ise belirli ortalama zaman ararlığında titrek salınım göstermiştir.

2000 yılından itibaren geliştirilen femtosaniye lazerler optik frekans ölçümlerinde yeni devrim niteliği taşır. Ti:Sa ve Er fiber femtosaniye lazer ışınımları fotonik fiberden geçtikten sonra kalınlıkları (20 - 100) fs ve aralarındaki zaman süreleri ise (1 - 100) ns atımlar şeklinde yayılır (Şekil 29). Bu lazer atımlarını frekans ölçeğinde incelediğimizde alışılmadık tablo ile karşılaşırız. Örneğin Ti:Sa femtosaniye lazeri (530 - 1100) nm aralığında aralarında yaklaşık ω_{rep}=1 GHz olan n=10^6 adet lazer kipi (modu) üretir [34].

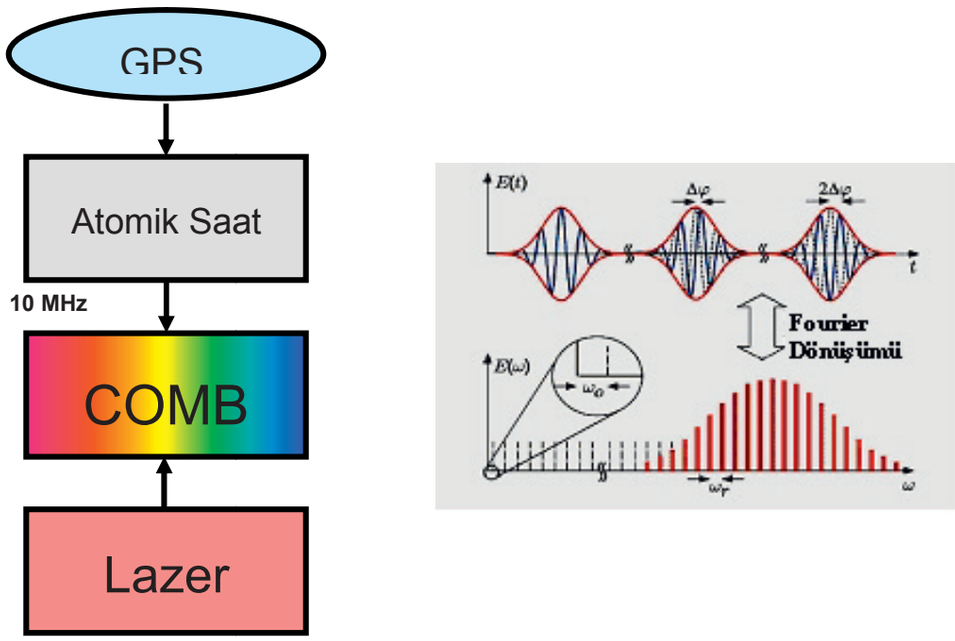


Şekil 28. İki He-Ne/I_2 lazerinin frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi

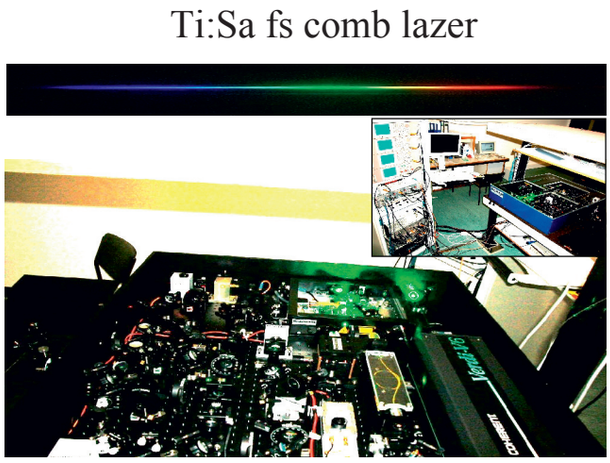
Oysa He-Ne/I_2 lazeri sadece bir dalgaboyunda (633 nm) lazer ışıması üretir. Dolayısıyla tek bir Ti:Sa fs lazeri ile (530 - 1100) nm aralığında çalışan herhangi bir lazeri "beat" yaparak aralarındaki frekans farkını ölçmek mümkün olmuştur. Burada ikinci önemli olan ise fs lazer tarakları (COMB) arasındaki frekans farkının ω_{rep} ve birinci ω_o tarak frekansının Cs atomik saatinin 1×10^{-14} belirsizlikle üretmiş olduğu 10 MHz referans sinyaline elektronik sistem ile kilitlenmiş olmasıdır. Bu durumda ölçülen lazer frekansı:

$$\omega_{Lazer} = \omega_o + n \times \omega_{rep} + \Delta\omega_{beat} \qquad (11)$$

şeklinde olacaktır.



Şekil 29. fs COMB temelli lazer mutlak frekans ölçüm sisteminin blok şeması



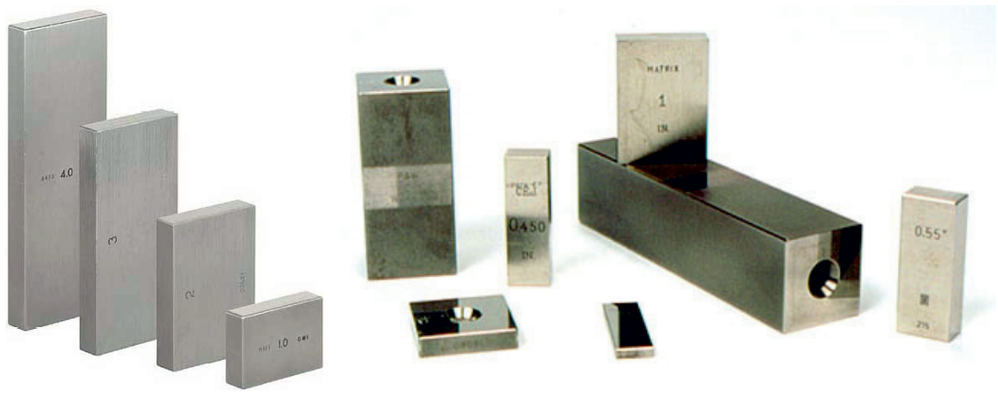
Şekil 30. Ti:Sa femtosaniye COMB lazerinin görüntüsü

Sonuç olarak 1955 - 1965 yılları arasında kuantum elektronik alanında başlatılan birçok önemli temel araştırmalar ilk lazerlerin yapımı ile sonuçlandı. Bir sonraki 40 yıllık zaman zarfında çok sayıda tek renkli (frekanslı) lazerler geliştirilerek atom ve moleküllerin enerji geçişlerine $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-12}$ - 10^{-14} belirsizliklerle kilitlendi. Lazer frekans kararlılıkları benzer iki lazerin karşılaştırmaları ile ölçülmüş ve gürültü faktörleri analiz edildi. RF spektral bölgede çalışan Cs ve H frekans standartlarının kullanımı ve RF-optik frekans zincirinde birçok lazerin mutlak frekansı 10^{-12} - 10^{-13} belirsizlikle ölçüldü. 2000 – 2010 yılları arasında ise fs COMB olarak bilinen ve tek lazerden milyonlarca renkli ışımanın üretimini sağlayan femtosaniye lazerin geliştirilmesi hem lazer frekans ölçüm belirsizliğini iyileştirmiş, hem de bu ölçümlerin çok sayıda laboratuvarda yaygınlaşmasını sağlamıştır. Son yıllarda yapılan fs COMB karşılaştırmalarında bu sistemlerin frekans belirsizliklerinin 10^{-15} den daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Lazer ve ölçüm alanında uluslararası gelişmelere paralel olarak son 15 yılda Türkiye'de birçok üniversitede uluslararası seviyede başarılı çalışmalar yapıldı. Lazerler ve ölçümler konusunda TÜBİTAK'da ilk çalışmalar lazer interferometresiyle yer değişim ölçümleri ve He-Ne lazer tasarımı ile Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi'nde 1986 yılında başladı. Şimdiki adıyla TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü olarak bilinen bu enstitüde, Cs ve Rb atomlarının, I_2 ve CH_4 moleküllerinin enerji geçişlerine 10^{-11} - 10^{-14} kararlılık ile kilitlenmiş Nd:YAG/I_2 (532 nm, 1064 nm), He-Ne/I_2 (633 nm), ECDL/Rb (780 nm), ECDL/Cs (852 nm), He-Ne/CH_4 (3340 nm), Yb fiber COMB (600 nm - 1750 nm) lazerleri geliştirilmiş ve lazerlerin frekansları ulusal Cs atomik saatinden tetiklenmiş fs Ti:Sa COMB ile ölçülmüştür. Frekansı kararlı lazerlerin kullanımı ile yapılan lazer spektroskopi deneylerinde atomlar arası çarpışmalar analiz edildi. Lazerler ve interferometrelerin kullanımı ile 1 mm - 1 m boyutundaki mastar blokların uzunluğu (50 – 250) nm belirsizlikle ölçüldü. Ayrıca lazerler ile hassas yer değişim ve açı ölçümleri, mikrodalga alan şiddetinin analizi ve ölçümleri, fs fiber COMB lazerinin geliştirilmesi yeni araştırmalar arasında yer almaktadır.

Mastar Blokları ve İnterferometrik Ölçümler

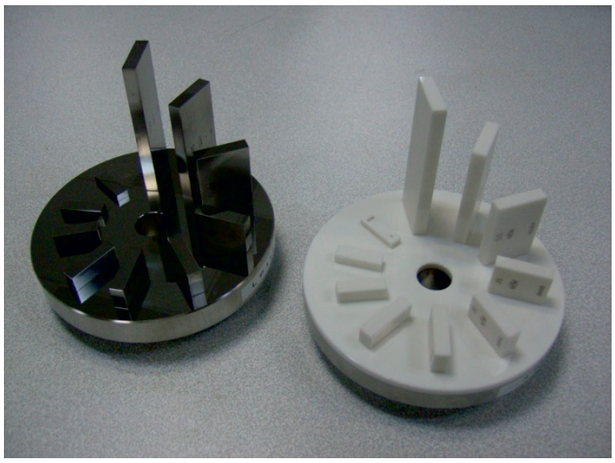
Mastar bloklar (Şekil 31), standartlarda belirtilen normları taşıyarak metre biriminin hassas bir şekilde transfer edilmesinde (taşınmasında, aktarılmasında) kullanılan ölçme elemanlarıdır [35][36][37][38].



Şekil 31. Mastar blokları

Metre birimi, mastar blok interferometresi aracılığı ile yapılan birinci seviyede ölçümler ile mastar bloklarına aktarılır (Şekil 32). Daha sonra bu mastar bloklar referans olarak kullanılarak karşılaştırma yöntemi ile endüstride referans ve çalışma mastarı olarak kullanılacak mastar bloklarına aktarılır. Bir referansa göre karşılaştırma yöntemi ile yapılan bu ölçümler, ikinci seviye ölçümlerdir. Bir ülke genelinde hizmet veren ikinci seviye laboratuvarlar ve endüstride yer alan firmaların kalibrasyon laboratuvarları tarafından gerçekleştirilen seviyedeki ölçümler İkinci seviye olarak adlandırılan gruba girmektedir. Burada adı geçen mastar bloklarının tam tanımı ise belirli standart ve normlarda belirtildiği şekilde, “birbirine paralel ve düz işlenmiş iki ölçme yüzeyi arasında uzunluk birimini muhafaza eden ve taşıyan, uzunluk biriminin aktarılmasında kullanılan transfer ölçme elemanlarına mastar blok denir” şeklinde yapılır.

Mastar bloklar çok çeşitli malzemelerden üretilirler, ancak standartlarda belirtilen koşulları sağlayabilmesi için belli bir sertliğe ve yansıtıcı yüzeye sahip olması gerekir. Bu nedenle her malzemeden de üretilemezler, üretilseler bile kullanışlı olmazlar, çabuk hasar görürler. Bunlar göz önüne alındığında; sert alaşımlı çelik, tungsten karbür (tungsten karbit), krom karbür (krom karbit) ve seramik, mastar blok üretiminde en çok kullanılan malzemeler arasındadır.

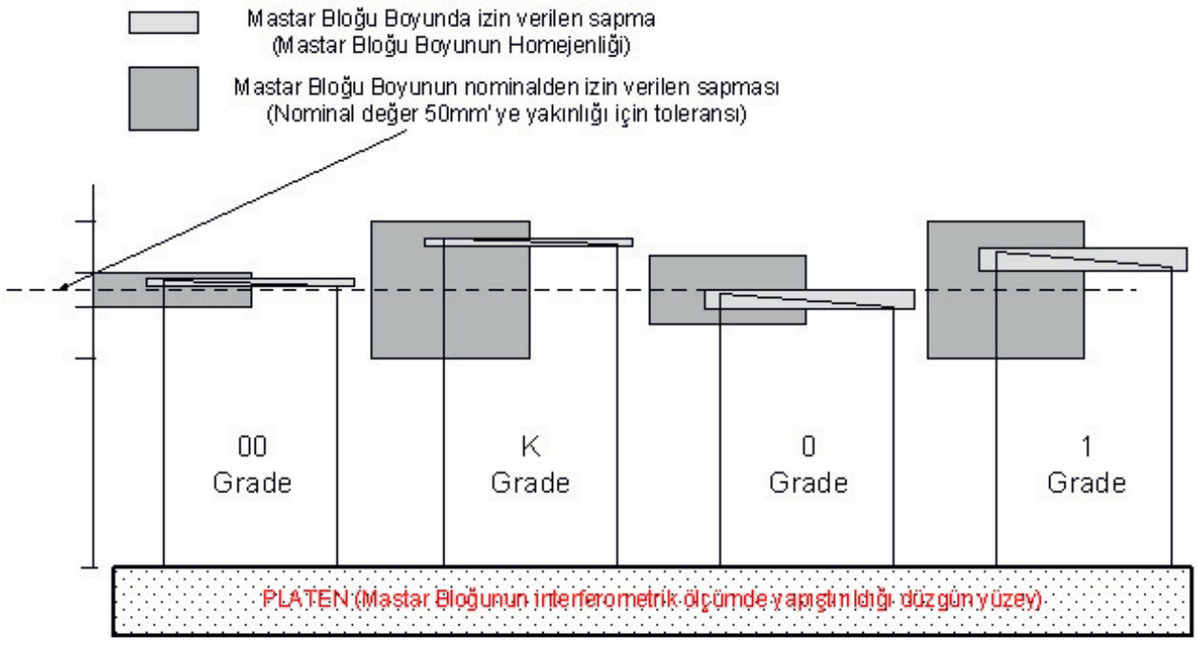


Şekil 32. İnterferometrik ölçüm için hazırlanmış mastar blokları (Platenlara yapıştırılmış)

Mastar bloklar, üretildikleri malzemenin özelliklerine göre spesifik özelliklere sahip olurlar. Örneğin; mastar bloğun sertliği, yüzey yansıtma kalitesi, sıcaklıktan etkilenmesi, kolay hasar görmesi, kullanım koşullarına ve zamana bağlı olarak mastar blokta meydana gelebilecek kusur ve hasarlar üretildiği malzeme özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Bu belirtilen özelliklerin hepsi ölçüm kalitesine etki eden faktörlerdir. Ancak içlerinden sıcaklık, ölçümün sonucunu da etkileyebilecek en önemli parametre olarak anılabilir.

Aslında sıcaklık tüm boyutsal ölçümlerde çok önemlidir. Çünkü sıcaklığın değişmesiyle (azalması ya da artması) malzemenin sıcaklıkla uzama katsayısına bağlı olarak mastar blok ya uzayacaktır ya da kısalacaktır. Söz konusu ölçülecek boyut boy değilse örneğin form ise yine malzeme sıcaklığa bağlı olarak genleşeceği için formunda da değişimler olacaktır ve benzer etkenlerden dolayı gerçek boyutların bulunmasında sıcaklık önemli bir rol oynar. Bu nedenle hemen hemen tüm boyut ölçümleri gibi mastar blok ölçümleri de tüm dünyada referans sıcaklık olarak kabul edilen 20 ºC'de ölçülürler ya da tam olarak bu sıcaklık değerinde ölçüm yapmak mümkün olamayacağı için ölçümün yöntem ve kalitesine de bağlı olarak izin verilen sıcaklık aralığında örneğin (20 ± 0,5) ºC'de ölçüm yapılır. Ancak sonuçlar 20 ºC'deki değere düzeltme yapılarak verilir. Yani hangi sıcaklıkta ölçülürse ölçülsün sonuçlar 20 ºC'de sahip olacağı boyut ne ise hesaplanarak bu değer beyan edilir. Tüm dünyada da aynı sıcaklık değeri referans alındığı için ölçümlerin birbirine uyumu bu açıdan sağlanmış olur.

Mastar bloklar izlenebilirliğin pratik ve ekonomik bir şekilde aktarılmasını sağlarlar. Mastar bloklar, mastar blok olabilmesi için standartlarda belirtilen özellikleri taşımakla beraber üretim kalitelerine göre kullanım yerleri farklılık gösterir: En iyi yüzey kalitesi ve düzlemselliğine sahip mastar bloklar yapışma kabiliyetine de sahip olmalarından dolayı birinci seviye yani mutlak ölçüm diye adlandırılan interferometrik ölçüme uygun oldukları için tercihen referans olarak kullanılırlar.

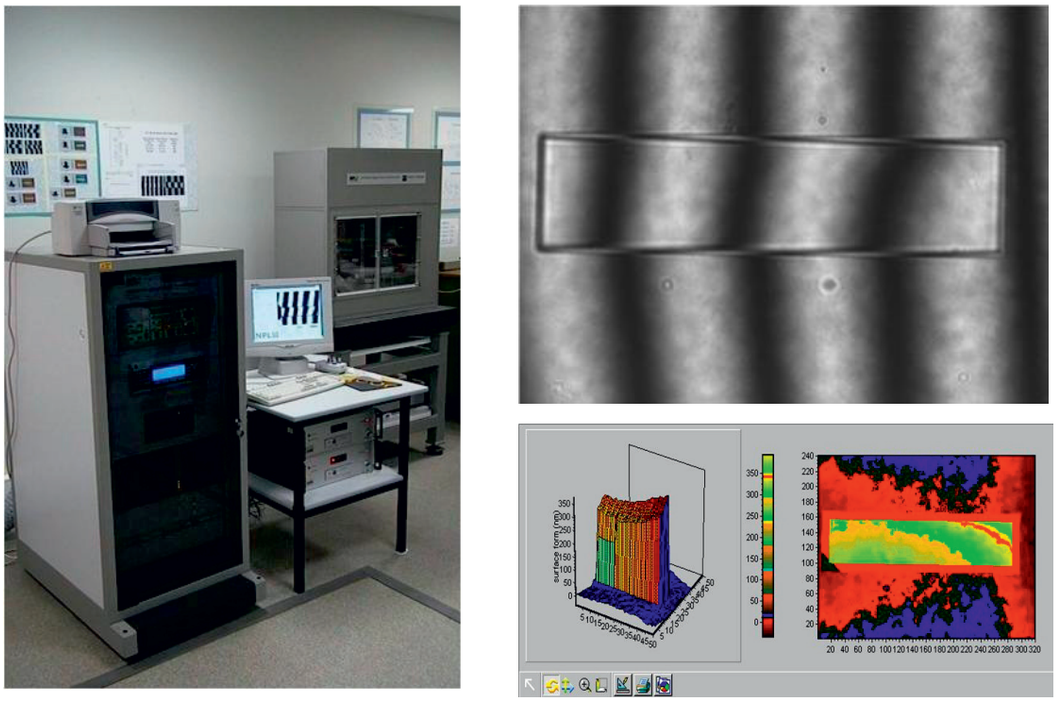


Şekil 33. Mastar bloklarının sınıfları ve aralarındaki farklar

Not: Şekil 33, mastar blokların yüzey kalitelerine bağlı olarak, üretici firmalar tarafından imal edilen ve endüstride kullanılan durumlarına göre açıklanmıştır. ISO 3650:1998 Mastar Blokları standardı itibariyle, 00 sınıf (Grade) mastar blokları kaldırılmıştır. (Mastar bloklarda sınıflandırma işlemi kaldırılarak, yüzey kalitelerini sadece kabaca ayırt etmek amacıyla kullanılır. Kalibrasyon sonucunda önemli olan sınıf değil, mastar bloğun sapma değeridir) [39].

Işık referans alınarak elde edilen metre birimi doğrudan bu mastar bloklara aktarılarak izlenebilirliğin aktarılmasında birinci basamağı oluşturur (Şekil 34). Boyutları birinci seviye ölçüm ile düşük bir belirsizlikle bilinen bu mastar bloklar mekanik karşılaştırma yönteminde referans olarak kullanılarak endüstride kullanılacak mastar bloklara metre biriminin aktarılmasıyla ikinci seviye ölçümlerin izlenebilirliği de sağlanmış olur (Şekil 35). Daha sonra ikinci seviye ölçümler ile

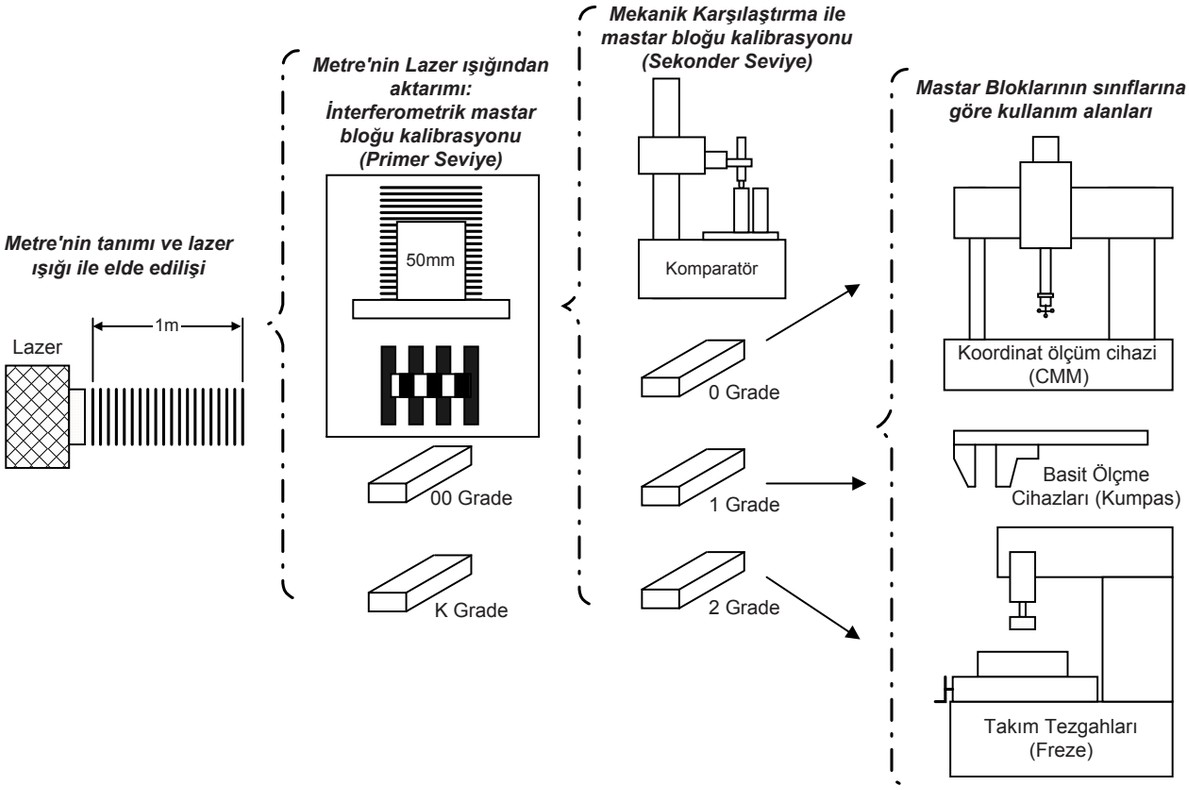
metre birimini taşıyan bu mastar bloklar ya ikinci seviye ölçümlerde kendilerine eş ya da daha düşük sınıflardaki mastar blokların daha geniş bir belirsizlik aralığıyla metre biriminin aktarılmasında kullanılırlar ya da basit ölçme aletleri, CMM tezgahları gibi çok hassas olmayan kalibrasyonlarda referans olarak, üretim hattı gibi ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılarak gerçekleştirilen her ölçümün, üretilen her parçanın metreye izlenebilir olması sağlanır. İzlenebilirlik zinciri (Şekil 36); en son gerçekleştirilen mesela basit ölçme aletlerinden bir kumpasın, yukarıda anlatılan ölçüm silsilesi ile metrenin ışıktan elde edilen ölçümüne kadar dayanması ve belirlenen değerlerinin bu birinci seviyede elde edilen değerlere göre belirlenmiş olmasıdır.



Şekil 34. Mastar blok interferometresi kullanarak mastar blok kalibrasyonu



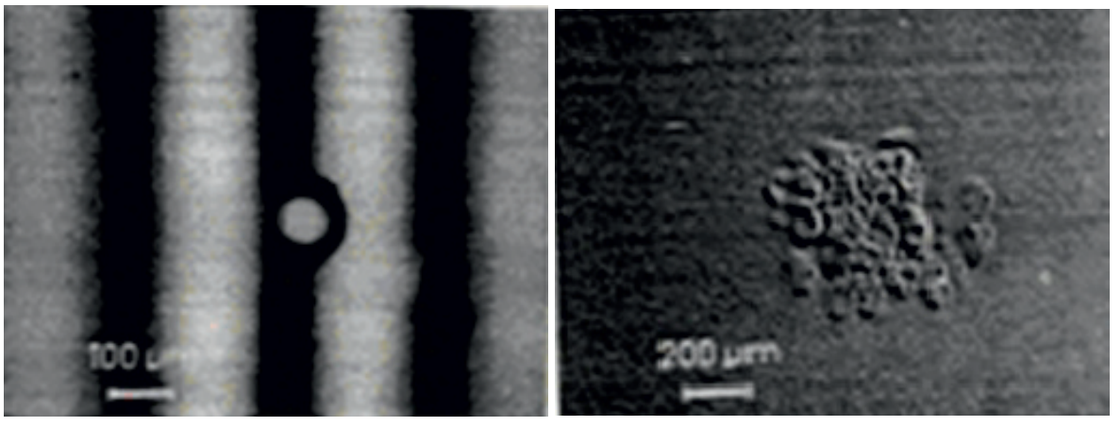
Şekil 35. Mastar blok komparatörleri kullanarak mastar blok kalibrasyonu



Şekil 36. Mastar bloklarının sınıflarına göre kullanımı ve izlenebilirliğin aktarımı

Mastar blokların hasar görmemesi ya da daha açık bir ifadeyle hasar görmemesi, ömrünün uzun olması için malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak belirli saklama ve kullanım koşullarına uyulmalıdır. Örneğin çelik veya tungsten karbür malzemeden üretilmiş mastar bloklar, üretim malzemeleri olan çeliğin ya da tungsten karbürün malzeme özelliğinden dolayı paslanmaya elverişlidir. Bu yüzden kullanım sırasında özellikle de ölçme yüzeylerine çıplak elle dokunulmaması gerekir. Eldeki yağ mastarın üzerinde kalır ve zaman içerisinde paslanmaya neden olur. Eğer yanlışlıkla ya da mecburen dokunulduysa hemen petroleum ether gibi mastar blokların temizliğinde kullanılan çözücü ile temizlenmelidir. Mastar blokların kullanılmadığı zaman da paslanmalarını engellemek için koruyucu bir yağ ile kaplanarak kaldırılmalıdır. Kullanım öncesinde bu koruyucu madde temizlenmelidir. Ancak seramik ve krom karbür malzemeden üretilmiş mastar blokların, üretildikleri malzemelerin paslanma özelliği olmaması nedeniyle paslanma gibi bir problemleri yoktur. Bu malzemelerin de sertlik değerlerinin çok yüksek olmasından dolayı en ufak bir çarpma düşme gibi bir durumda kırılganlık gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca seramik malzemeden birinci seviyede ölçüm için gerekli olan yansıyan bir yüzeyi elde etmek de zordur. Görüldüğü gibi mastar blokların standartlarda belirtilen özellikleri taşımalarının yanında üretildikleri malzeme de büyük önem taşımaktadır ve bu her zaman kullanımda, ölçümde, ölçümün belirsizliğinin belirlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken bir etkendir.

Mastar bloklar kullanımları sırasında zaman içinde hasar görebilirler (Şekil 37). Bu durumlardan bazıları giderilebilir bazıları ise giderilemeyecek kadar büyük kusurlar olabilir. Zaman içinde oluşan paslanmalar, ki genelde ortamın nem değerine bağlı olarak zaman içinde bu paslanmalar ve kullanım koşullarına bağlı olarak çizikler, çukurlar görülebilir.





Şekil 37. Mastar blok yüzeylerinde meydana gelen hasarlar ve tespiti

Bu kusurlar, ölçme yüzeyinde ve çok fazla değilse giderilebilir. Ancak tamamen gidermek mümkün değildir. Örneğin pası ne kadar alırsanız alın bir süre sonra aynı yerden tekrar paslanma olacaktır çünkü paslanma, malzemenin içine işleyen kimyasal bir olaydır ve biz mastar bloğa zarar vermemek, mastar blok özelliğini taşıyabilmesi için standartlarda belirtilen gerekli değerleri bozmamak için paslanmayı sadece yüzeysel olarak alabiliriz. Aynı şekilde çizikler gibi kusurlar da özel bir taşlama işlemi ile giderilebilir. Ancak bütün bu kusurlar ölçme yüzeyinde ise kusurları giderme işleminde bulunmalı, yan yüzeylerde bulunan kusurların hiçbirisi giderilmeye çalışılmamalıdır. Ölçme yüzeyindeki kusurlar da ölçmenin gerçekleştirildiği noktalarda değilse, ölçümü etkilemiyorsa giderilebilir. Aksi halde mastar blok artık mastar blok özelliğini taşımıyor olmaları nedeni ile bu amaçla kullanılmamalı ve sertifikalandırılmamalıdır. Bu nedenlerden dolayı mastar bloklar sadece dikdörtgen prizma şeklinde demir parçaları olmayıp, belirli standartlara göre üretilmiş, lazerlerden laboratuvar ortamında elde edilen metre biriminin günlük kullanıma, endüstriye aktarılmasını sağlayan hassas ölçme ara elemanları ve referans standartlarıdır.

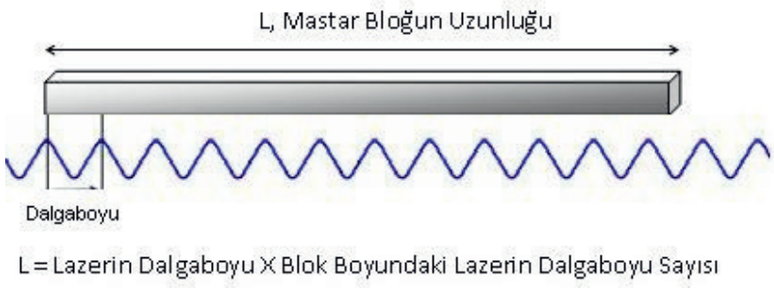
Mastar Bloklarda İnterferometrik Ölçümler

Metre tanımına paralel olarak, **interferometre** sistemlerinin kullanımı ile uzunluk birimi metrenin frekans standardı (dalgaboyu standardı) olarak kullanılan kararlı lazerlerden transfer standardı olan mastar bloklara aktarılması sağlanmaktadır [40][41][42].

Günlük hayatımızda bir cismin uzunluğunu ya da bir mesafeyi ölçmek istediğimizde, ölçümümüzü bu cisme ya da bu mesafeye uygun bir cetvel kullanarak yapmaktayız. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ne kadar hassas bir ölçüm yapmak istediğimizdir. Eğer milimetre (mm), ya da 1 milimetrenin binde biri olan mikrometre (µm) hassasiyetinde bir ölçüm yapacaksak, bunlara uygun uzunluk aletlerine (metre, mikrometre, kumpas vs.) rahatlıkla ulaşabiliriz. Fakat daha hassas bir ölçüme ihtiyaç duyuyorsak, örneğin 1 milimetrenin bir milyonda biri olan nanometre (nm) mertebesinde bir ölçüm için, günlük hayatta kullandığımız uzunluk ölçüm aletleri yeterli olmayacaktır. Bu durumda, dalga boyları nanometre mertebelerinde olan ışık imdadımıza yetişir.

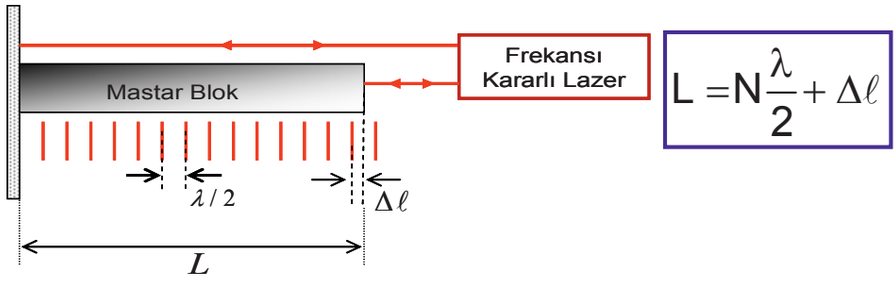
Işığı, bir cismin uzunluğunu ölçmekte ya da mesafe ölçümünde kullanılacak bir ölçü aleti, ışığın dalga boyunu ise uzunluk birimi gibi düşünebiliriz. Böylece yaptığımız ölçüm işlemi aslında, bir cismin boyunda ya da ölçülecek mesafede, ışığın dalga boyundan kaç tane olduğunu hesaplamaktan ibaret olmaktadır. Eğer aynı yöntemle fakat daha hassas bir ölçüm yapmak istersek, ölçülecek uzunluk boyunca tam dalga boyunun sayısını bulmaya ek olarak, bir dalga boyundaki kesirli kısımlara (tam olmayan ondalıklı kısımlar) da ulaşmamız gerekir.

Mastar Blok İnterferometrelerinde, lazer ışığı, uzunluğunu ölçmek istediğimiz mastar blok boyunca gönderilmekte ve blok boyunda lazerin dalgaboyundan kaç tane olduğu ölçülerek, mastar bloğun L boyuna ulaşılmaktadır.



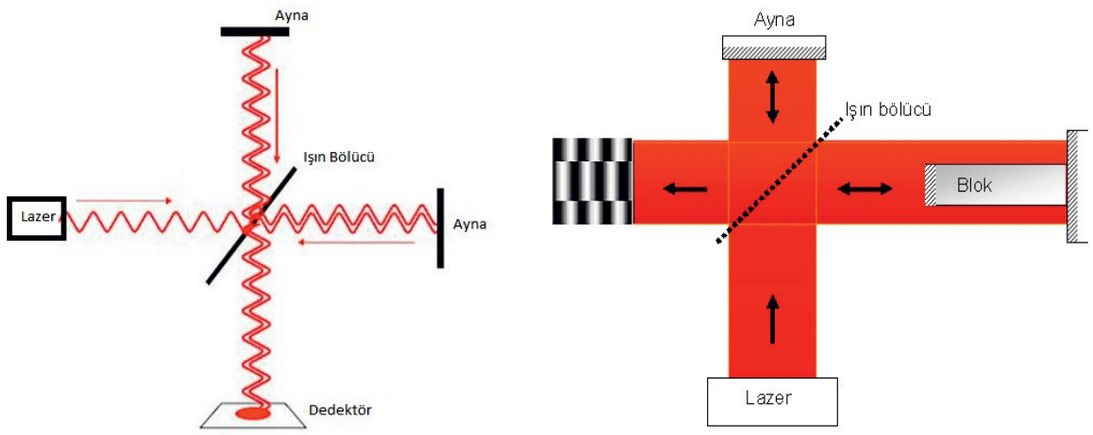
Şekil 38. Mastar blok boyunca gönderilen Lazer ışını

Kısacası, kararlı lazerlerimiz cetvelimiz, mastar bloklar ise uzunluğunu ölçmek istediğimiz cismimiz olmaktadır.



Şekil 39. Mastar blok boyundaki ışığın dalgaboyunun (λ) tam (N) ve kesirli kısımlarının (Δl) hesaba katılarak mastar bloğun boyunun (L) elde edilmesi

İnterferometrik mastar blok ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için, bloklar interferometre sistemlerinde lazer ışığının optik yolu üzerine yerleştirilirler (Şekil 39). İnterferometrelerin temel çalışma prensipleri Optik Yüzeylerde İnterferometrik Ölçümler konu başlığı altında detaylı olarak anlatılmıştır.Şekil 40.(a)'da bir Michelson İnterferometresi sisteminde Lazer kaynağından çıkan ışığın, bir dalganın hareketi şeklinde optik yüzeylerden ilerleme ve yansımaları görülür. Şekil 40.(b)'de ise aynı prensibe sahip bir interferometrik ölçüm sisteminde kaynaktan çıkan ışınlar genişletilmiş ve paralel hale getirilmişlerdir (Twyman Green İnterferometresi) . Mastar blokların uzunlukları ise şekilde görüldüğü gibi interferometrede optik yollardan birine yerleştirilerek ölçülür.



(a) (b)

Şekil 40. (a) Michelson İnterferometresi ışın optik yolları (b) Twyman-Green prensibine göre çalışan Mastar Blok İnterferometresi

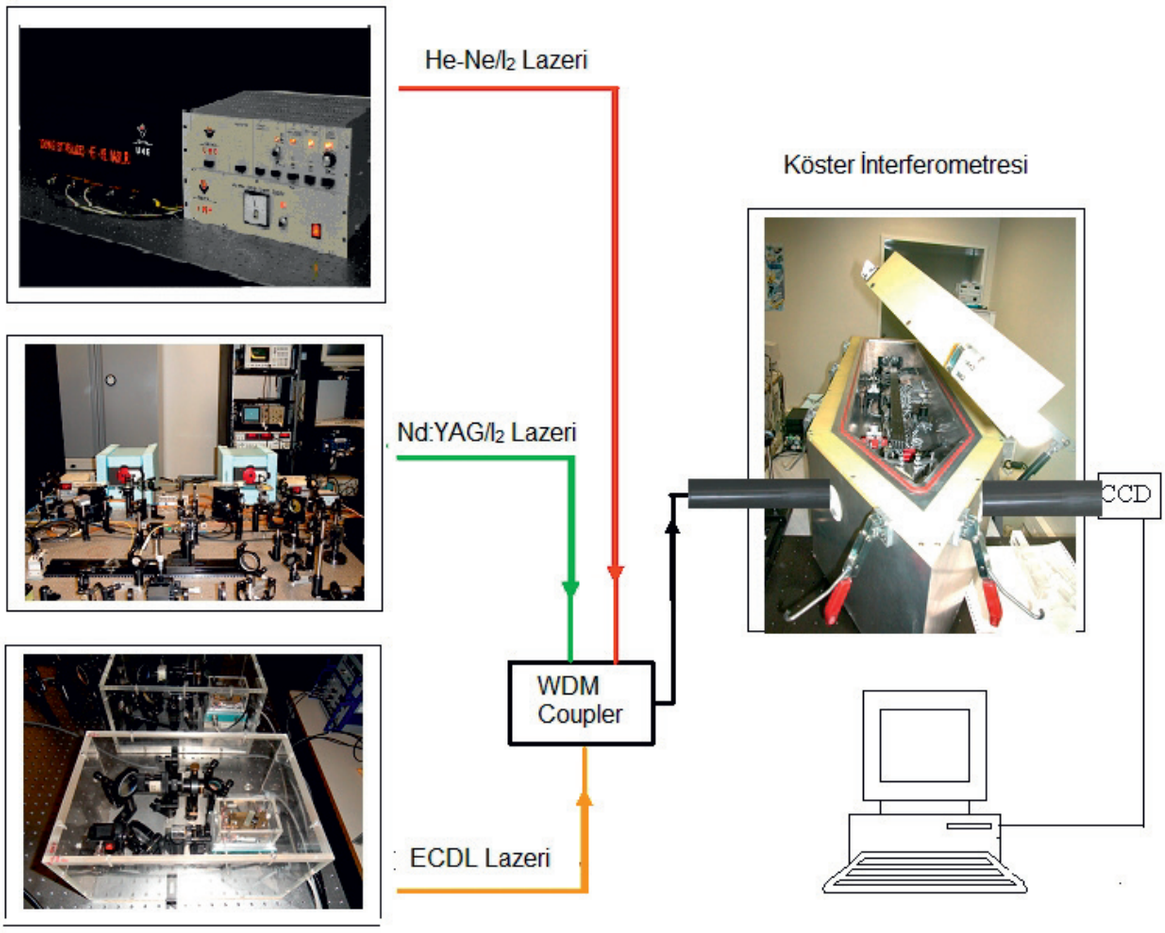
İnterferometreler prensip olarak, dalga boyu değerlerinin tam olarak bilindiği ışık kaynakları kullanılarak, bilinmeyen bir niceliği ölçmeyi amaçlar. Örneğin bir cismin uzunluğunun, bir mesafenin, belli bir ortamdaki havanın kırılma indeksinin, bir camın kırılma indeksinin ölçülmesi ya da cisimlerin 3 boyutlu yüzey profillerinin çıkartılması, interferometrik yöntemle yapılan ölçümlerden sadece birkaçıdır [43].

İnterferometrelerde, ışık kaynağı olarak beyaz ışık (halojen lamba), belli dalga boylarında ışık yayan lambalar ya da lazerler kullanılır. Lazerin keşfi (1970) ile interferometrik uygulamaların gelişimi hız ve çeşitlilik kazandı. Bu gelişmelerde, lazer demetinin tek dalga boylu (monochromatic), eş fazlı (coherent) ve doğrusal (directional) olmasının etkisi büyüktür.

Mastar Blok İnterferometreleri'nde kullanılan lazerler, frekansı kararlı hale getirilmiş lazerlerdir. TÜBİTAK UME, lazerlerini ve frekansın kararlı duruma getirilmesi için gerekli mekanik ve elektronik sistemlerini tasarlamış ve üretmiştir. Bu kapsamda üretilen ve sürekli yapılan iyileştirmelerle zaman içinde ticari formata getirilen kararlı lazerler şunlardır;

- İyot enerji geçişlerine kilitleme sistemi ile He-Ne Lazeri (He-Ne/I_2)
- İyot enerji geçişlerine kilitleme sistemi ile Nd:YAG Lazerleri (Nd:YAG/I_2)
- Cs ya da Rb atomlarının enerji geçişlerine kilitleme sistemi ile Dış Kaviteli Diyot Lazerler (ECDL/Cs ya da ECDL/Rb)

Uzun Mastar Blokların (100 mm ve üzerinde) uzunlukları, uluslararası standartlar gereği interferometrelerde yatay konumlandırılarak ölçülür (Şekil 41). Kısa Mastar Bloklar (0,3 mm - 100 mm) ise dikey yerleştirilerek ölçülmektedir (Şekil 32). Blok yerleşimlerininin farklı olması nedeniyle, bu ölçümlerde kullanılan interferometrelerin isimleri Uzun Mastar Blok İnterferometresi ya da Kısa Mastar Blok İnterferometresi olarak adlandırılır.



Şekil 41. UME köster uzun mastar blok interferometresi ve frekansı kararlı lazerler (Nd:YAG/I_2, He-Ne/I_2 ve ECDL/Rb-Cs)[44][45]

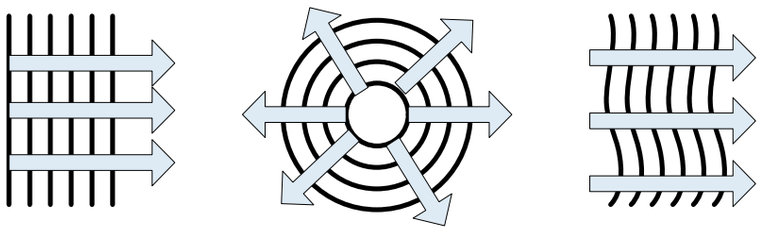
Kararlı lazer üretimlerinde olduğu gibi benzer şekilde TÜBİTAK UME, Şekil 41'de görülen Uzun Mastar Blok İnterferometresini kendi bünyesinde tasarlamış ve üretmiştir [46][47][48].

İnterferometre isimlerinin farklı olmasına rağmen, bu interferometreler tamamen aynı ölçüm prensibine göre çalışır. Mastar blokların yerleşimlerine ve optik yollara bağlı olarak, kullanılan optik elemanlar açısından birtakım farklılıklar taşısalar da, seçilen yöntemlere göre, uzunluk ölçümünde izlenen yollar, metodlar, kullanılan yazılım ve donanım programları tamamen aynı olabilmektedir.

Mastar blok uzunluk ölçümünün (mastar blok kalibrasyonu) yanı sıra interferometrik uzunluk ölçümleri, laboratuvarda bulunan diğer kararlı lazerler ve Comb sisteminin kullanımı ile bu konuda ya da farklı alanlardaki Ar-Ge çalışmalarına da katkıda bulunur. Böylece, ölçüm yeteneklerinin artırılmasına ve daha hassas ve farklı ölçümlerin gerçekleştirilmesine yönelik süregelen bir gelişim sağlanır.

Optik Yüzeylerde İnterferometrik Ölçümler

İnterferometrik yöntemler, ışığın dalga özelliğini kullanarak, aynı yönde ilerleyen iki optik dalga yüzünün (wavefront) birbiri ile etkileşiminin incelenmesi sonucu bu dalgayüzünü oluşturan kaynaklar hakkında bilgi verir (Şekil 42). Bu bilgi, mastar blok interferometrelerinde olduğu gibi bir mastar bloğun boyunu nominal bir boy yardımı ile belirlemekte kullanıldığı gibi aynı zamanda yüzey topografyası hakkında da bilgi edinmeyi sağlamaktadır.



Şekil 42. Düz, küresel ve bozulmuş ilerleyen dalgayüzleri

Burada kullanılan girişim tekniğinde bir ışık kaynağından (genellikle lazer) elde edilen ışık dalgası ile çeşitli optik düzeneklerle istenilen dalgayüzü oluşturulur. Örnek olarak paralel şekilde z yönünde ilerleyen harmonik düz bir dalgayüzü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\psi(z, t) = A \cos[2\pi (\frac{z}{\lambda} - \nu t) + \delta] \quad (12)$$

A : Dalga büyüklüğü

λ : Dalgaboyu [nm]

ν : Dalganın frekansı (birim zamandaki dalga sayısı) [nm^{-1}]

t : Zaman [s]

δ : Faz farkı [radyan]

Dalgayüzü, eksponansiyel şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\psi = A\, e^{-i(kz - \omega t + \delta)} = A\, e^{-i\phi} \quad (13)$$

k : Dalga numarası ($k=2\pi/\lambda$) [nm^{-1}]

ω : Harmonik frekans ($\omega = 2\pi\nu$) [nm^{-1}]

İki dalgayüzünün süperpoze olması ile oluşan ışık şiddeti (lümen);

$$I = \left| A_1\, e^{-i\phi_1} + A_2\, e^{-i\phi_2} \right|^2 \quad (14)$$

$$I = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 \times A_2^* + A_1^* \times A_2 \quad (15)$$

$$I = I_1^2 + I_2^2 + 2 \times (I_1 \times I_2)^{1/2} \times \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (16)$$

A_1 ve A_2 : Birinci ve ikinci dalgayüzü genlikleri

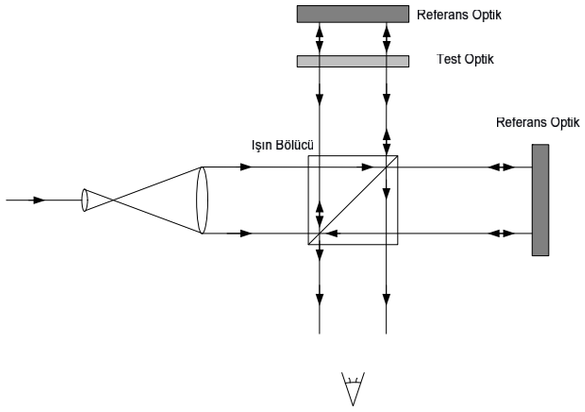
A_1^* ve A_2^* : Birinci ve ikinci dalgayüzü genliklerinin kompleks eşlenikleri

ϕ_1 ve ϕ_2 : Birinci ve ikinci dalgayüzlerinin faz açıları (radyan)

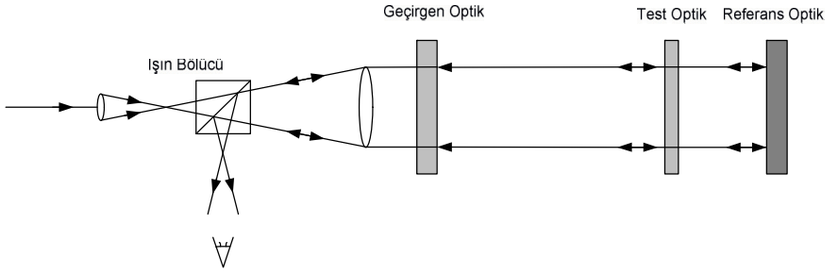
Yukarıdaki formülden de anlaşılacağı gibi iki dalgayüzünün birleşimi (süperpoze olması) sonucu elde edilen dalgayüzü sönümlenmiş ya da katlanmış olabilir. Bu, aynı dalgaboyunda ve aynı

frekansta olduğu varsayılan iki dalgayüzünün fazları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Faz farkını oluşturan ise iki dalgayüzü arasındaki optik yol farkıdır. Eğer bu dalgayüzlerinden birisi referans olarak kabul edilirse, test dalgayüzü hakkındaki bilgi bu süperpoze olmuş dalgayüzü kullanılarak elde edilebilir.

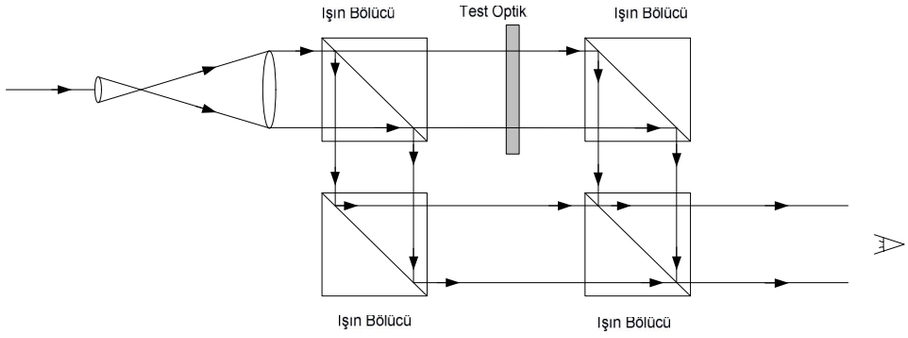
Yukarıdaki tanım interferometrenin en genel çalışma prensibidir. Süperpoze olacak iki dalgayüzü oluşturmak için bir ışık kaynağından gelen dalgayüzü genelde bir polarize ışın bölücü optik yarımı ile ikiye ayrılarak biri referans diğeri test yüzey üzerine gönderilir. Bunun için çeşitli interferometre optik düzenekleri tasarlanmıştır. En geniş kullanılan düzenekler olarak Michelson (Twyman–Green) (Şekil 43), Fizeau (Şekil 44) ve Mach–Zehnder (Şekil 45) interferometreleri sayılabilir. Bunlara ait interferometre düzenekleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 43. Twyman-Green interferometresi

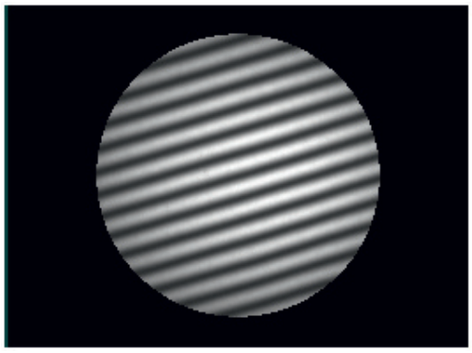


Şekil 44. Fizeau interferometresi



Şekil 45. Mach-Zehnder interferometresi

Optik yüzey metrolojisinde interferometrinin kullanımı referans bir yüzeyden edilen dalgayüzünün test edilmesi istenen yüzeyde oluşturulan dalga yüzü ile süperpoze edilmesi sonucunda yukarıda da özetle bahsedilen dalgayüzleri arasında optik yol farkı oluşturmak ve bu optik yol farkından interferans (girişim) saçaklarını elde etmektir. Şekil 46'da bir test yüzeyinden alınmış saçak (fringe) görüntüsü verilmiştir.



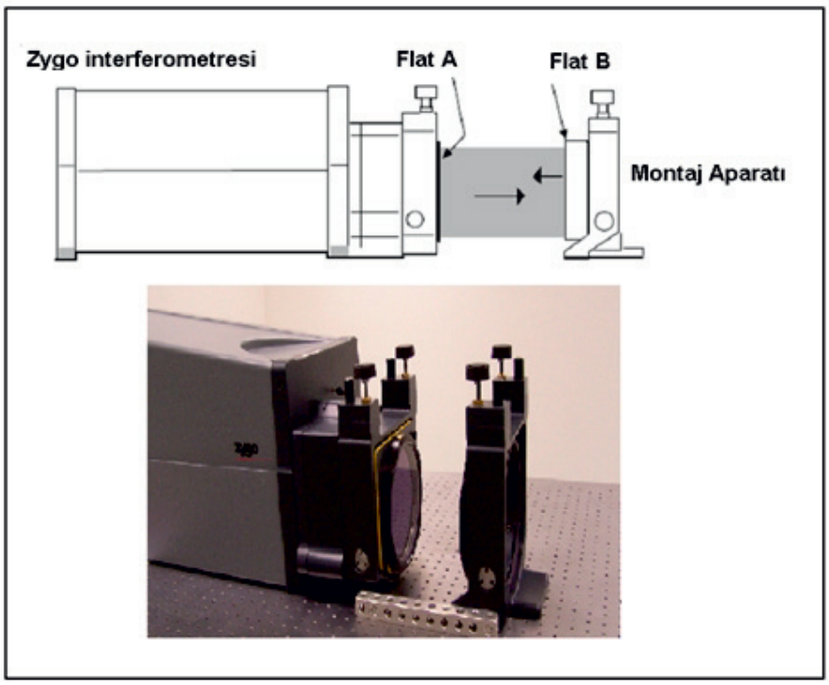
Şekil 46. Referans düz yüzey ile karşılaştırılarak elde edilmiş düz bir yüzeye ait interferans (girişim) saçak (fringe) görüntüsü

Yüzeyin referans yüzeye göre eğimi saçak görüntüsü işlenerek bulunur. Her bir saçak periyodu arasındaki mesafe kullanılan lazer dalgaboyunun yarısı ile orantılıdır. Çözünürlüğü çeşitli yöntemlerle artırılmayan yalın bir interferometre sisteminde çözünürlük dalga boyunun yarısı ile sınırlıdır. Bu yüzden birden fazla lazer dalgaboyu kullanılması ya da optik faz farkının faz kaydırma metotları ile modüle edilmesi gibi metotlar kullanılarak çözünürlüğün artırılması sağlanır.

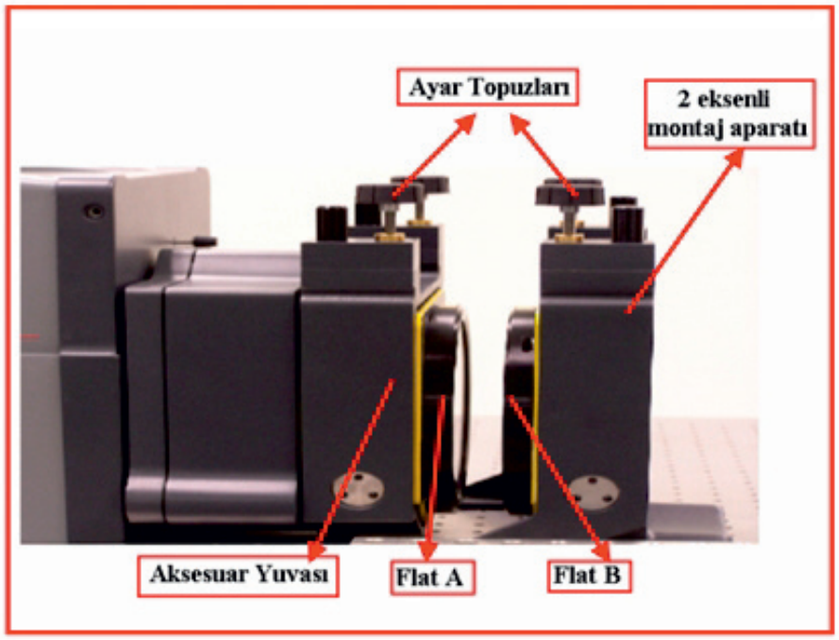
Bu yöntemler, faz farkının modüle edilmesi tekniğinde kullanılan lazer kaynağına göre "heterodyne" ve "homodyne" interferometri olarak ikiye ayrılır. Homodyne lazer interferometre sistemlerinde, tek frekanslı lazer kaynağı yukarıda da bahsi geçen interferometre düzenekleri ile kullanılır. Test yüzeyden yansıyan F_1 lazer frekansı ile faz kaydırılmış hareketli test yüzeyinden yansıyan $F_1 \pm \delta F$ frekansı algılayıcıda interferans oluşturarak fark frekansı (beat frequency) oluşturulur. Heterodyne interferometre sistemlerinde ise çift frekanslı lazer ışık kaynağı kullanılır. Böylece test yüzeyden yansıyan $F_1 - F_2$ lazer frekansı ile hareketli test yüzeyinden yansıyan faz kaydırılmış $F_2 - F_1 \pm \delta F$ frekansı algılayıcıda interferans oluşturarak fark frekansı (beat frequency) oluşturulur.

Bu yöntemlerle nanometre altı hassasiyetlerde yüzey görüntüleri almak mümkündür. İnterferometrik yüzey ölçümleri her zaman bir referans yüzey ile test yüzeyin karşılaştırılarak iki yüzey arasındaki farktan elde edilen saçak görüntülerinin işlenmesidir. Bu sebeple referans yüzey üzerindeki her türlü hata ve kusurları test yüzey verilerinden ayırmak (hata ayırma1618) mümkün değildir. Bu yüzden interferometrik ölçümlerde en büyük belirsizlik kaynağı referans yüzeyden gelen belirsizliktir. "3-flat" tekniği, üç geçirgen optik yüzeyin karşılıklı ikili test-referans çifti olarak ölçülerek karşılıklı hataların birbirinden çıkarılarak kullanıldığı, hata ayırmaya dayalı bir tekniktir. Bu teknikte A-B-C olarak adlandırılabilecek optik yüzeyler A-B, B-C, A-C referans-test çiftleri olarak birbirleri ile karşılaştırılır. Elde edilen sonuçlar hata ayırma kullanılarak, referans yüzeyin hatası test yüzeyinden ayrıştırılır.

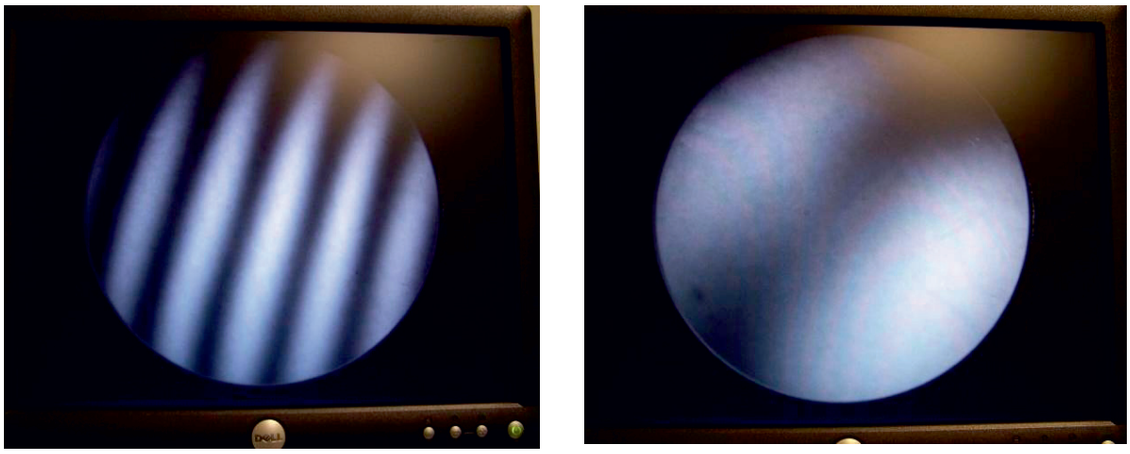
Zygo Verifire interferometresi Fizeau interferometresine örnek olarak verilebilir. Şekil 47 ve Şekil 48'de Zygo interferometresi üzerinde referans ve test optik düzlemler görülmektedir. Şekil 49'da ise sıfır saçak indirgeme işlemi görülmektedir.



Şekil 47. Zygo Verifire AT Düzlemsellik İnterferometresi ve ölçümün şematik görüntüsü

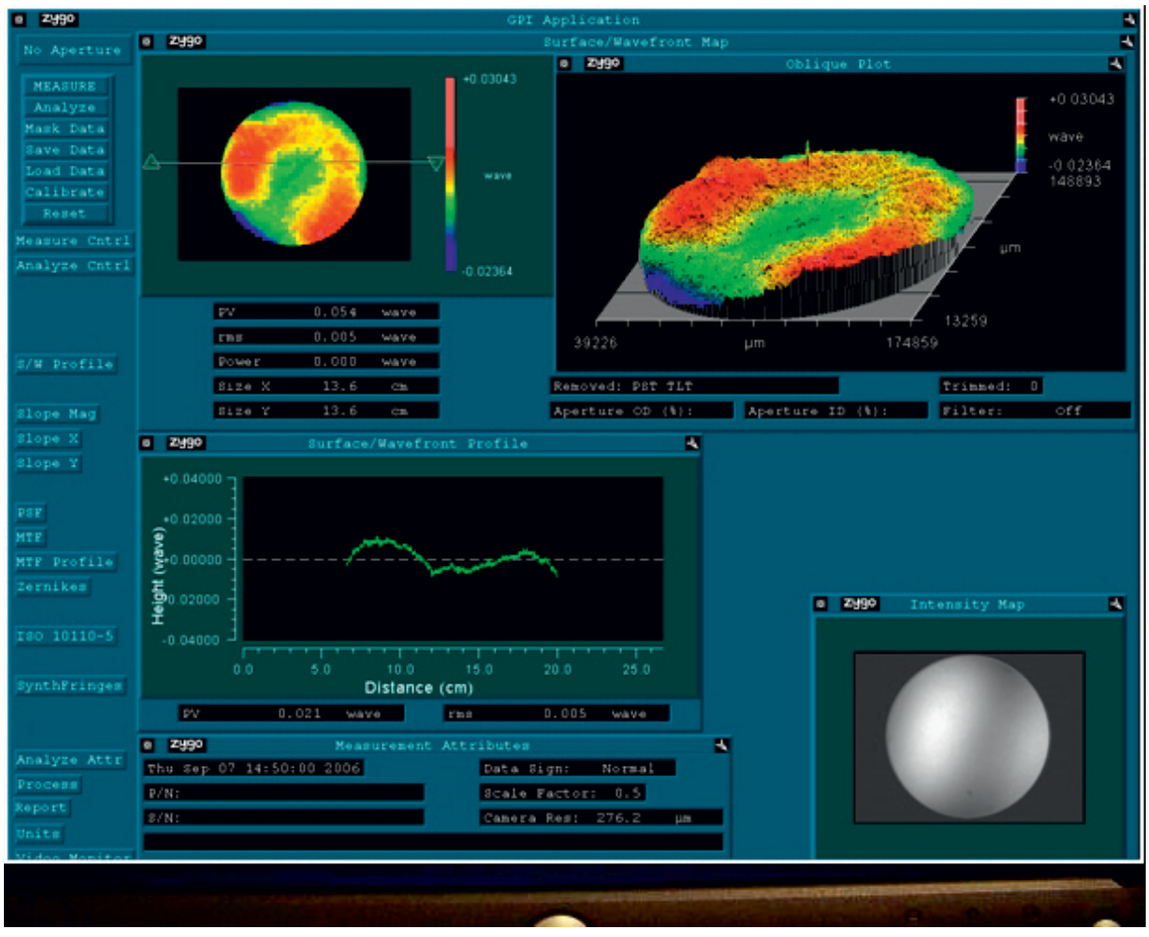


Şekil 48. Zygo Verifire AT Düzlemsellik İnterferometresi ve ölçümün şematik görüntüsü

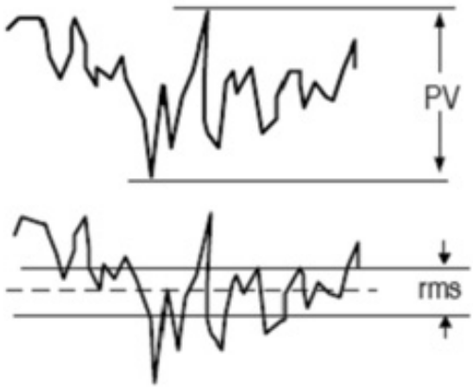


Şekil 49. Sıfır saçak indirgeme işlemi

Şekil 50'de ölçülen referans bir yüzeye ait düzlemsellik yazılımının görüntüsü görülmektedir.



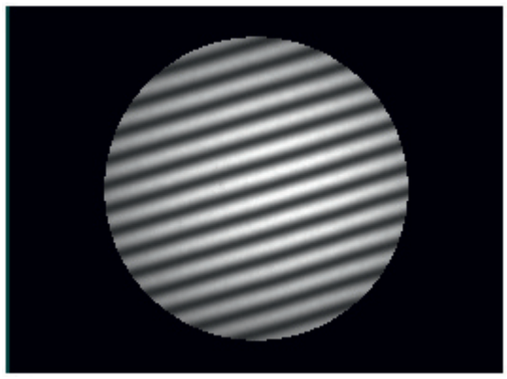
Şekil 50. Zygo Verifire At İnterferometresi ile ölçülen optik bir düzlemin MetroPro yazılımı görüntüsü.



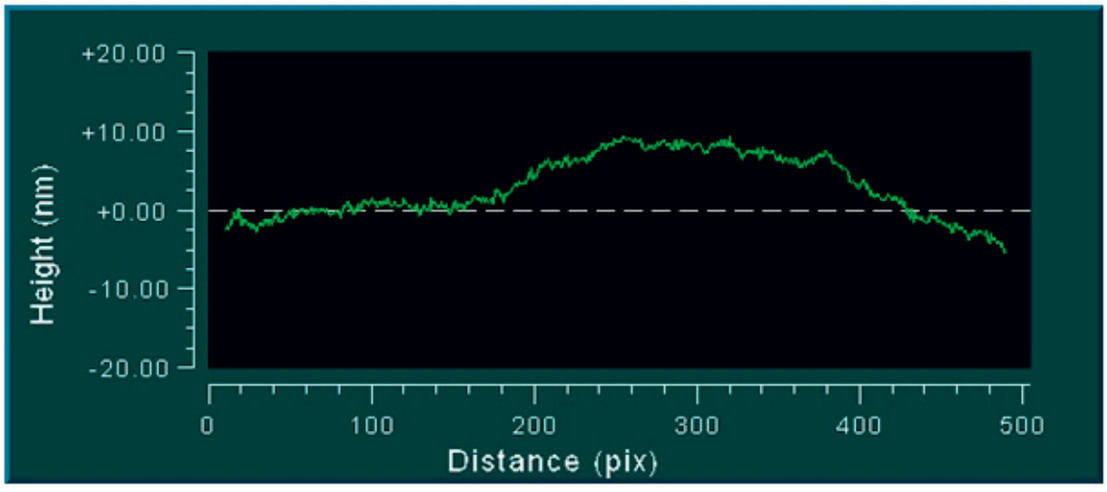
Şekil 51. PV ve rms değerlerinin şematik gösterimi

Genel olarak ölçülen büyüklük “PV” ve “rms” değerleridir. “PV (peak-to-valley)” değeri, yüzeyin en yüksek noktası ile en alçak noktası arasındaki farkı, “rms (root mean square)” ise yüzeyin her noktasının yüzey ortalamasından farkının kareleri toplamının ortalamasını verir (Şekil 51).

Şekil 52 ve Şekil 53’de bir optik düzlemsellik ölçümüne ait saçak görüntüsü ve yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzeyin 3 boyutlu topoğrafyası elde edilebileceği gibi, 2 boyutlu projeksiyonu ya da bir kesit üzerindeki yükseklik profili de görüntülenebilir.

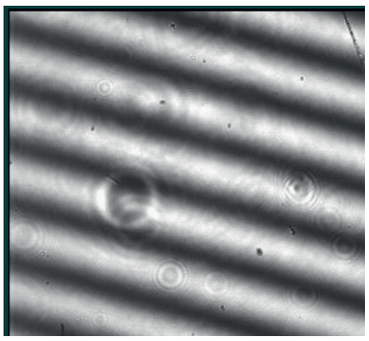


Şekil 52. Optik referans yüzeyin paralellik ayarı yapılmamış saçak görüntüsü.

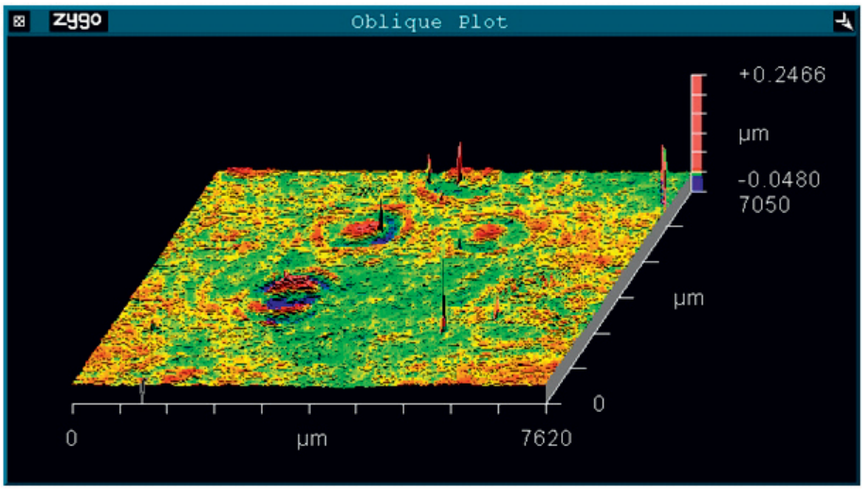


Şekil 53. Yüzeyin herhangi bir kesiti alınarak bu kesit boyunca yüzeyin profili

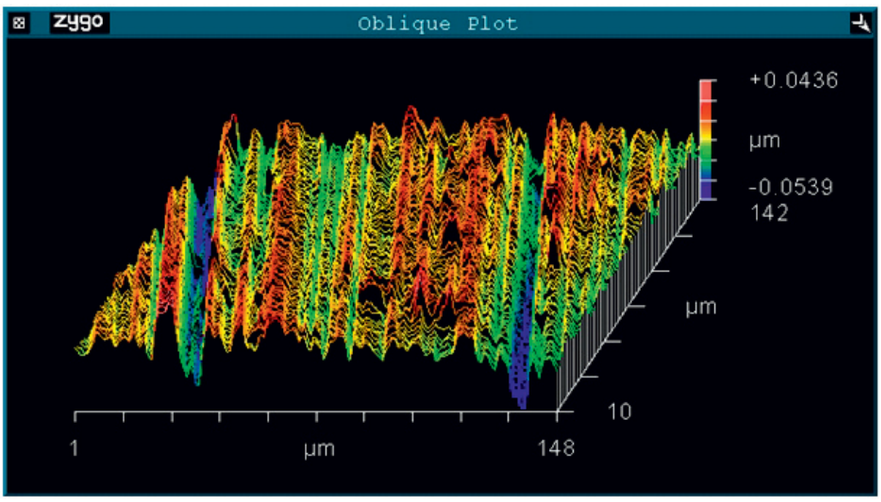
İnterferometrik düzlemsellik ölçümlerinde en büyük belirsizlik kaynağı, kullanılan referanstan kaynaklanan belirsizliktir (Şekil 54, Şekil 55, Şekil 56). Ortam şartlarından kaynaklanan belirsizlik ortamın titreşimini azaltmak için kullanılan vibrasyon izolasyon masası ve optik yol üzerindeki hava akımının önlenmesi ve ortam sıcaklığının stabil (kararlı) olması ile minimize edilir.



Şekil 54. Bir kusurlu yüzey üzerinde alınan interferans saçakları



Şekil 55. Bir kusurlu yüzey üzerinde alınan saçakların işlenmiş yüzey görüntüsü



Şekil 56. Üzerinde kanallar oluşmuş bir yüzeyden alınan saçakların işlenmiş yüzey görüntüsü

Temel Ölçme Cihazları

Temel ölçme cihazları endüstride yaygın kullanıma sahip boyut ölçüm cihazlarıdır. Bazı fabrikalarda binlercesi aktif olarak kullanılmaktadır.

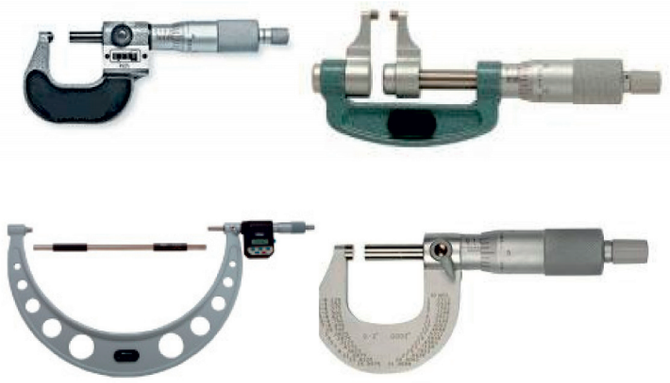
İmalat anında üretilen parçanın üretim toleransları içerisinde olup olmadığının kontrolünde veya imalattan sonra üretilen parçanın, hassas ölçümlere başlamadan önce ilk kontrolünde yaygın olarak kullanılırlar [49][50][51].

Temel ölçme cihazları olarak tanımlanan cihazları dört başlık altında toplayabiliriz;

1. Mikrometre
2. Kumpas
3. Mihengir
4. Ölçü saati

Mikrometre

Vidalı bir milin sabit bir ünite içerisinde hareket ederek ilerlemesi prensibi ile üretilen temel ölçüm cihazlarıdır. Yaygın olarak kullanılan mikrometreler dış çap mikrometreleridir (Şekil 57). (0-100) mm aralığında üretilenler en yaygın kullanıma sahip olanlardır. Aynı tür mikrometlerin bile farklı yapıda üretilmiş olanlarını bulmak mümkündür. Üretim kolaylığı, ucuz maliyet ve dayanıklı olması sebebiyle gövde dökme demir veya çelik, ölçüm mili ve sabit çene ise çelikten üretilmektedirler [52].



Şekil 57. Farklı tip mikrometreler



Şekil 58. Optik cam ile ölçüm çeneleri paralellik ölçümü

Mikrometreler için Kalibrasyon Metotları

Mikrometre kalibrasyonu; skala kalibrasyonu, ölçüm uçlarının düzlemsellik ve paralellik ölçümlerini kapsar.

Mikrometrelerin sakala kalibrasyonu, çoğunlukla referans sıcaklıkta (20 °C), çalışma aralığını yeteri sayıda farklı noktalarda kontrol edebilecek mastar blokları ile ölçülerek gerçekleştirilir.

Ölçüm uçları düzlemsellik ve paralellik ölçümleri, optik camlar yardımıyla ışığın dalga özelliği kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Şekil 58).

Kumpas

Boyut ölçümlerinde kullanılan en basit ve temel ölçü aletleridir. Sabit bir çeneye ait kızak üzerinde hareket eden ve üzerinde skalası olan hareketli çeneden oluşur.

Çoğunlukla çelikten imal edilen kumpaslar (Şekil 59) 3000 mm'ye kadar üretilir.



Şekil 59. Kumpaslar

Kumpas için Kalibrasyon Metotları

Kumpas kalibrasyonu; skala (dış çap, iç çap ölçüm çeneleri, derinlik ve adım) kalibrasyonu, ölçüm uçları düzlemsellik ve paralellik ölçümlerini kapsar.

Kumpas skala (dış çap ölçüm çeneleri, derinlik ve adım) kalibrasyonu, referans sıcaklıkta (20 ^{o}C), çalışma aralığını yeteri sayıda farklı noktalarda kontrol edebilecek mastar blokları ile ölçülerek gerçekleştirilir. İç çap ölçüm çeneleri kalibrasyonu için ise halka mastarlar kullanılır. Ölçüm uçları düzlemsellik ve paralellik ölçümleri, yaygın olarak kullanılan ışık sızması metodu veya farklı metotlar ile doğrudan ölçülerek yapılır.

Mihengir

Kumpaslar gibidirler fakat dik çalışırlar ve sabit çene olarak zemini kullanırlar. Çoğunlukla çelikten imal edilen mihengirler (Şekil 60) 3000 mm'ye kadar üretilirler.



Şekil 60. Farklı tip mihengirler

Mihengir için Kalibrasyon Metotları

Mihengir kalibrasyonu; skala kalibrasyonu, ölçüm ucu ve taban düzlemsellik ölçümü ile kolon diklik ölçümlerini kapsamaktadır.

Mihengir skala (dış çap ölçüm çeneleri, derinlik ve adım) kalibrasyonu, referans sıcaklıkta (20 °C), çalışma aralığını yeteri sayıda farklı noktalarda kontrol edebilecek mastar blokları ile ölçülerek gerçekleştirilir.

Ölçüm uçları düzlemsellik ve paralellik ölçümleri, yaygın olarak kullanılan ışık sızması metodu veya farklı metotlar (ölçü saati, hassas prob, CMM (üç boyutlu ölçüm cihazı) vb.) ile doğrudan ölçülerek yapılabilmektedir.

Ölçü Saati

Ölçü saatleri (Şekil 61) yapısal özelliklerine göre ölçü piminin hareketini farklı konfigürasyonlardaki dişli çark mekanizmaları ile büyüterek, dönen bir skalaya yansıtan mekanizmalardır. Kullanım kolaylığı ve uygulama çeşitliği sebebiyle imalat sırasında yaygın kullanıma sahiptirler. Türleri kullanılacak yere ve uygulamaya göre farklılık gösterir.



Şekil 61. Farklı tip ve şekildeki ölçü saatleri

Ölçü Saatleri için Kalibrasyon Metotları

Ölçü saati kalibrasyonu; skala kalibrasyonu ve ölçme milinin kuvvet ölçümünü kapsar.

Ölçü saati sakala kalibrasyonu, referans sıcaklıkta (20 °C), çalışma aralığını yeteri sayıda farklı noktalar kontrol edebilecek ve daha iyi çözünürlüğe sahip cihazlar ile ölçülerek gerçekleştirilir. Ölçümler sonunda elde edilen değerlerden, standartlarda beyan edilen parametreler hesaplanır ve standart değerin altında olup olmadığı kontrol edilir. Kuvvet ölçümleri için basit kuvvet ölçerler kullanılır.

Geometrik Standartlar ve Form Ölçümleri

Çap, Boşluk ve Vida Standartları

Boyutsal metrolojisinde mastar bloklarından sonra metrenin endüstriye aktarılmasında kullanılan en temel referanslar çap standartlarıdır. Çap standartları, laboratuvarlara ait ölçüm cihazlarının ilk ayar işleminde (set-up) kullanılabildikleri gibi, imalat atölyesi veya fabrikalarda elle alıştırma yöntemiyle parçaların seri bir şekilde kontrol edilmesi işleminde de kullanılırlar.

Çap standartlarından bahsedildiğinde (Şekil 62) ilk akla gelen mastarlar halka ve tampon mastarlar olmakla birlikte, küre ve pim mastarlar da bu grupta sayılabilecek mastarlardandır [54].

Halka-tampon mastarların yanında yaygın olarak kullanılan vida halka-tampon mastarları da çap standartları içerisinde saymak yerinde olur.



Şekil 62. Çap standartları

Çap standartları için farklı kaynak ve standartlarda farklı gruplandırmalar yapıldığı görülür. Fakat kullanım özellikleri göz önüne alındığında temel olarak iki gruba ayrılırlar; referans mastarlar ve atölye mastarları.

Referans Mastarlar

Referans mastarlar (Şekil 63) hassas olarak imal edilen ve ölçüm cihazlarının ilk ayar işleminde kullanılan, metre biriminin taşınmasını ve endüstriye aktarılmasını sağlayan temel mastarlardır. Bu mastarlar için önemli olan çap değerlerinin düşük bir belirsizlikle bilinmesidir. Bu sebeple üretilirlerken belirli bir çap tolerans aralığına göre üretilmezler. Çap değerinin düşük bir belirsizlik ile belirlenmesindeki en kritik nokta mastarın sahip olduğu (üretimden kaynaklı) form hatalarıdır (Yuvarlaklık, silindiriklik vb.). Formu ideal forma en yakın şekilde üretilen referans mastarların çap ölçümü için verilen belirsizlik değerleri, diğer mastarlara göre belirgin bir şekilde daha düşük olur. Bu da çap değerinin bilinmesindeki kesinliği ve hassasiyeti artırır [56].



Referans Halka Mastar | Referans Küre Mastar | Pim Mastarlar

Şekil 63. Halka, küre ve pim mastarlar

Halka-tampon (düz, vida) veya pim mastarların üretimlerinde çelik en çok tercih edilen malzeme olmasına rağmen, küre mastarlar seramik veya safirden üretilirler. Çünkü küre formunun en düzgün elde edilebildiği malzemeler seramik veya safirdir [57][58].

Atölye Mastarları

İmalat atölyeleri ve fabrikalarda üretilen parçanın imalat toleransları içerisinde olup olmadığını ölçmeden, elle alıştırma yöntemiyle, kontrol etmek amacıyla kullanılan mastarlardır [55][59].

Çoğunlukla halka tampon veya pim mastarı formunda çelikten üretilirler. Bu grupta referans mastarlardan farklı olarak çatal mastarlar da bulunmaktadır. Çatal mastarlar seri imalat sırasında üretilen parçaların istenilen tolerans değerleri içerisinde olup olmadıklarının hızlı ve güvenilir bir şekilde kontrol edilmesini sağlarlar. Halka mastarlar ile kontrol edilmesi mümkün olmayan mil sistemleri de çatal mastarlar ile kontrol edilirler.

Atölye mastarlarının (Şekil 64) çap değerleri kontrol edilen parçanın toleranslarından daha küçük toleranslar ile üretilirler; atölye mastarlarının kontrol edilecek çap aralığını (delik veya mil) tarayabilmesi için, o aralığın içerisine girebilecek (geçer mastarlar) veya girmeyecek (geçmez mastarlar) şekilde kontrol edilen parçanın toleranslarından daha küçük toleranslar ile üretilirler.



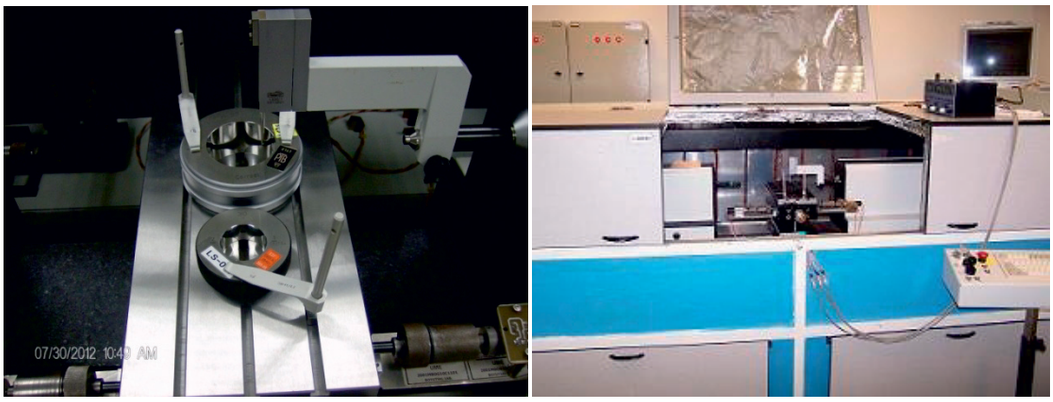
Geçer- Geçmez Çatal Mastar | Geçmez Tampon Mastar | Geçer Vida Tampon Mastar | Geçmez Vida Halka Mastar

Şekil 64. Atölye mastarları

Atölye mastarı “Geçer” ve “Geçmez” kısım olmak üzere iki kısımdan oluşur. Üretimden sonra kontrol edilecek parçanın el ile alıştırma yöntemiyle kontrolü sırasında, mastarın “Geçer” kısmı ile yapılan denemede üretilmiş olan parçaya (eğer istenilen toleranslarda üretilmiş ise) rahatlıkla geçmesi beklenirken, mastarın Geçmez kısmının geçmemesi beklenir. Tolerans dışı üretilen parçalar yukarıda anlatılan uygulamanın tersi gibi davranacakları için kolay tespit edilirler ve rahatlıkla ayırt edilebilirler [60].

Kalibrasyon Metotları

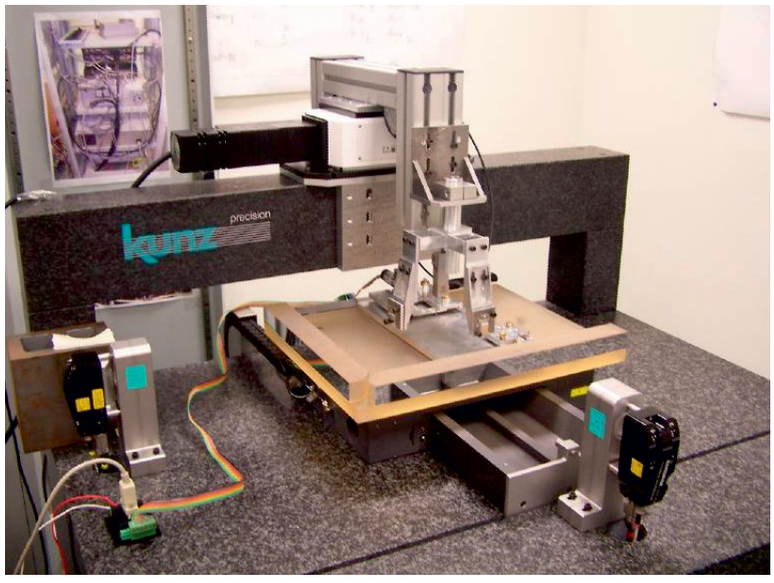
Referans ve atölye mastarlarının kalibrasyonları arasında bazı farklılıklar olmasına rağmen temelde kalibrasyon yöntemleri aynıdır. Temel işlem çap ölçümüdür [56]. En yaygın kullanılan metot mekanik karşılaştırma metodudur. Bu yöntem; ölçülecek çapa yakın değerdeki çap değerine sahip referans mastar ile değeri bilinmeyen mastarın çap değerlerinin karşılaştırılmasıdır (Şekil 65). Bu yöntemde ölçülecek olan mastarın ölçüm yüzeylerine ölçüm cihazının probu ile dokunarak bulunan çap değerleri ile referans mastar karşılaştırılmaktadır. Burada kullanılan referans mastar, kullanılacak olan cihazın ilk ayar işleminde kullanılan ve cihazın skalasının, kullanılan prob çapına ve çevre şartlarına göre düzeltilmesini sağlayan çap mastarıdır. Kısacası ölçülen çap değeri ile referans çap değeri karşılaştırılarak, ölçülen çapın referans sıcaklıktaki gerçek değeri bulunur. Böylece metre biriminin referans mastar ile transfer edilmesi sağlanır.



Şekil 65. UME Üniversal ölçüm cihazı

Vida mastarlarda ise bölüm dairesi çapı ölçümü (bazı standartlara göre diş üstü ve diş dibi çaplarının da ölçümü istenir.) tampon mastarlarda özel pimler (üç tel metodu) ve halka mastarlarda özel T-problar (çift küreli) kullanılarak ölçüm yapılır. Ölçülen değere göre EURAMET/cg-10 rehber dokümanında [55] tavsiye edilen yöntemlere göre hesap yapılarak bölüm dairesi çapı hesaplanır. Kalibrasyonlar için mikrometre benzeri fakat daha büyük ve daha hassas bir ölçüm skalasına sahip olan üniversal ölçüm cihazları kullanılır. Bu cihazlar ölçme milinin hareketini, ölçme miline bağlı optik skala sayesinde ölçerler.

Cihazlarda bulunan skalanın yerine uygun bir şekilde lazer interferometre sistemi yerleştirilir ve (Şekil 66) çap değeri, başka bir mastar ile karşılaştırılmadan, mutlak (metre biriminin tanımına göre doğrudan lazer ile) ölçüm ile elde edilir ise daha düşük bir ölçüm belirsizliği ile ölçülmüş ve ölçüm metrenin tanımına doğrudan izlenebilir olduğu için birinci seviye olarak yapılmış olur [62].



Şekil 66. Lazer interferometre ile çap ölçümleri (UME)

Referans mastarlar için çap ölçümünün yanı sıra mastarın form hatalarının da bilinmesi gerekir. Form ölçümleri bu iş için tasarlanmış form ölçüm cihazları ile yapılır. Referans mastara ait form hataları, mastar üzerinde çap ölçümlerinin yapıldığı kesitten (birden fazla kesitten çap ölçümü yapıldıysa birden fazla kesitten) ölçüm yapılarak bulunur.

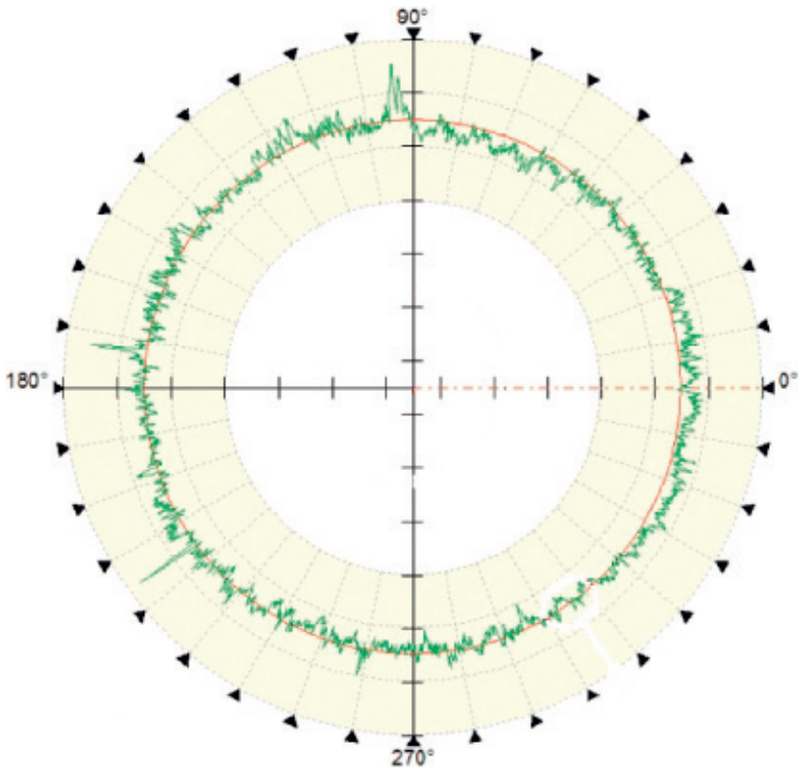
Sıcaklık boyutsal ölçümlerde sonucu etkileyen önemli bir etkendir. Çünkü sıcaklıkta meydana gelen değişmeler ile malzemenin sıcaklıkla uzama katsayısına bağlı olarak çap veya ölçülen boy ya uzayacaktır ya da kısalacaktır. Bu nedenle çap standartlarının ölçümleri boyutsal ölçümler için referans sıcaklık olarak kabul edilen 20 ºC'de ölçülürler. İdeal şartlarda ortam sıcaklığının veya ölçülen parça ve referans mastarın sıcaklığının tam olarak 20 ºC değerinde ölçüm yapmak mümkün olamamaktadır. Bu yüzden ölçümler kontrollü ortamlarda sıcaklık değişimi ölçülerek yapılır ve sonuçlar üzerinde düzeltme yapılarak 20 ºC'deki değer bulunur ve beyan edilir.

Form Ölçümleri

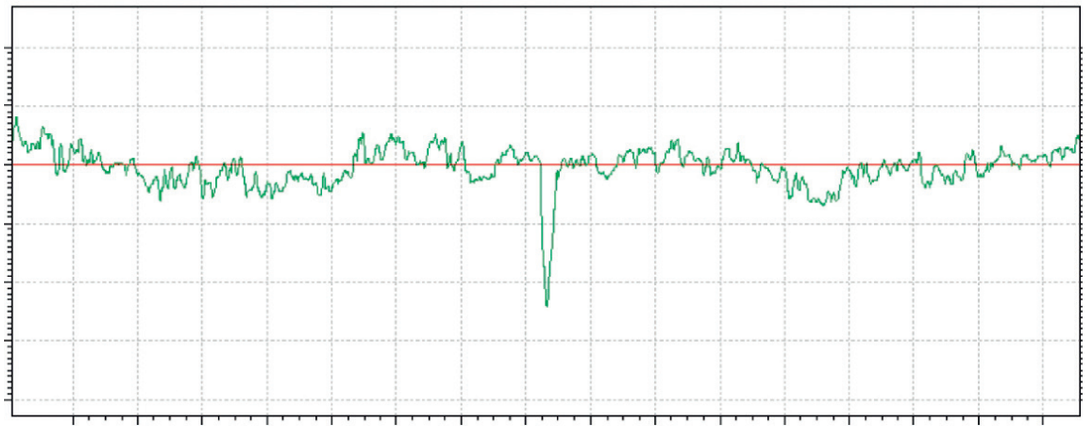
Form ölçümleri, cisimlerin yüzeylerinin ideal geometrik şekillerden sapmalarını tespit etmek için yapılır. Örneğin yuvarlaklık ölçümü cismin bir kesitinin ideal bir çemberden sapmasını, doğrusallık ölçümü yüzeyin ideal bir doğrudan sapmasını ifade eder [62][63].

İmalat sanayinde form ölçümleri büyük öneme sahiptir. Üretilen parçaların boyut ve montajdaki konumlandırma tamlığı sağlanmış olsa bile, eğer formu kabul edilebilir hata sınırları içinde değilse, parça fonksiyonunu yerine getiremeyebilir. Ayrıca boyut ölçümlerinin güvenilirliği için de form ölçümlerine ihtiyaç duyulur. Bu sebeple hassasiyetle ölçülmesi gerekir.

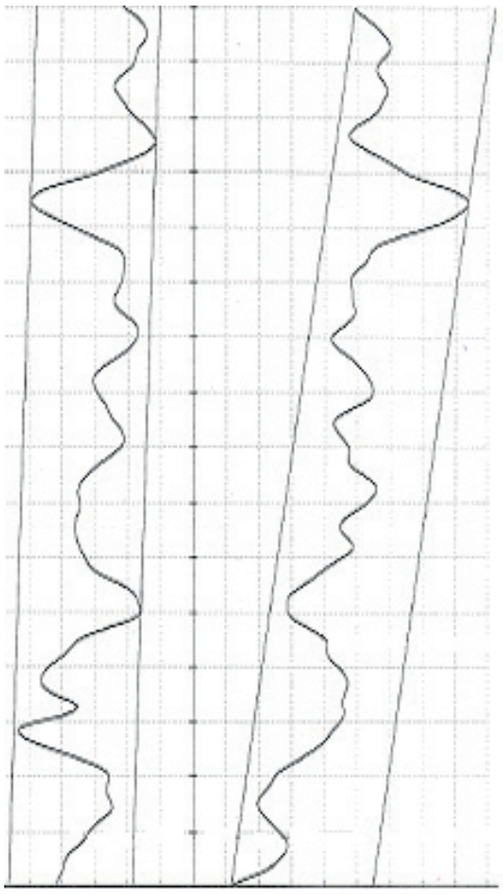
Form ölçümleri, cisimlerin yüzey yapısının makro ölçekte incelenebilmesi için yapılmaktadır. Yüzeyde alınan ölçümlerle yüzeyin profilleri elde edilir ve bu profillerde pek çok form parametresi hesaplanabilir. Örneğin yuvarlaklık, doğrusallık, paralellik ve diklik yaygın olarak hesaplanan form parametreleridir. Aşağıda bu parametrelerin ölçüm örnekleri sunulmaktadır (Şekil 67…Şekil 73).



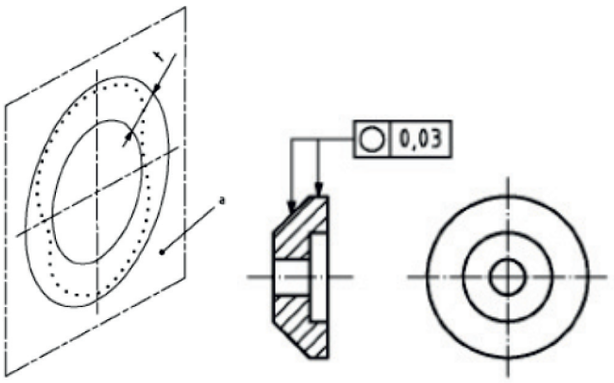
Şekil 67. Bir silindir veya kürenin yuvarlaklık profili (radyal sapmalar yüzlerce kez büyütülmektedir)



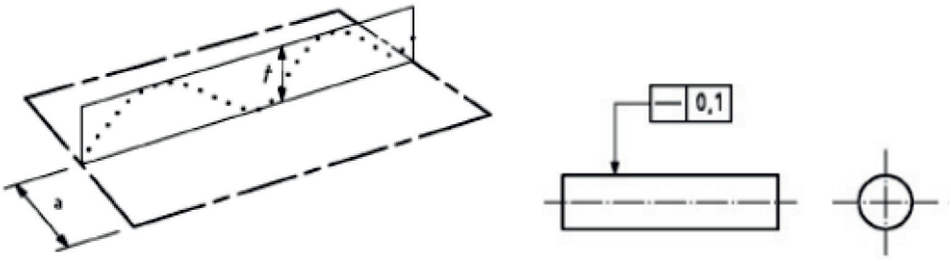
Şekil 68. Düz bir yüzeyin doğrusallık ölçümü
(Yüzeye dik yöndeki sapmalar yüzlerce kez büyütülmüştür.)



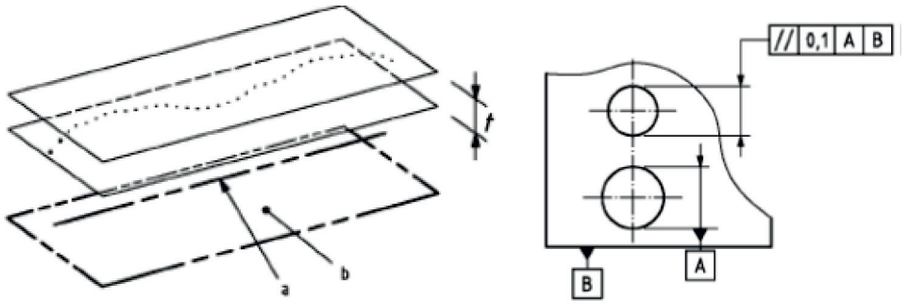
Şekil 69. Silindirik bir parçanın karşılıklı yüzeylerinin birbirine paralelliği
(Yüzeye dik yöndeki sapmalar yüzlerce kez büyütülmüştür.)



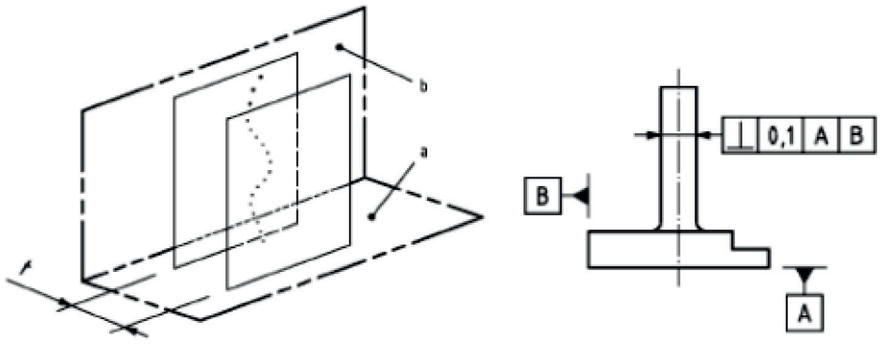
Şekil 70. Yuvarlaklık parametresi ve teknik resimde gösterimi



Şekil 71. Doğrusallık parametresi ve teknik resimde gösterimi



Şekil 72. Paralellik parametresi ve teknik resimde gösterimi

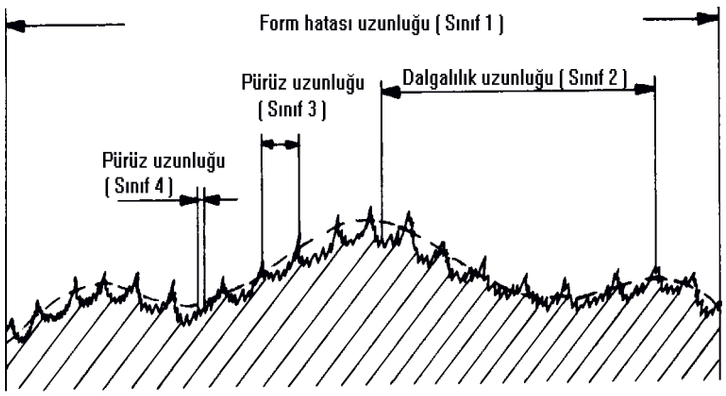


Şekil 73. Diklik parametresi ve teknik resimde gösterimi

Temelde form ve pürüzlülük ölçümleri benzer prensibe sahiptir. Aralarındaki en önemli fark yüzey düzensizliklerinin dalga boylarının farklı mertebelerde olmasıdır. Tablo 13'de ve Şekil 74'de yüzey sapmaları, uzun dalga boyundan kısa dalga boyuna doğru 6 farklı sınıfa ayrılmıştır. Form ölçümleri 1. ve 2. sınıf sapmalarla ilgilidir.

Tablo 13. Yüzey düzensizliklerinin sınıflandırılması

Yüzey Düzensizliği	Sapmanın Tipi	
Sınıf 1: Form hatası 	Doğrusallık, düzlemsellik, yuvarlaklık, silindiriklik, herhangi bir çizgi profilden veya herhangi bir yüzey profilinden sapma	Form sapmaları
Sınıf 2: Dalgalılık 	Dalgalılık	
Sınıf 3: 	Pürüzlülük (oluklar)	Pürüzlülük sapmaları
Sınıf 4: 	Pürüzlülük (çok ince pürüzler, kaydedilebilen en küçük pürüzler)	
Sınıf 5: Resimle gösterilemeyecek kadar küçük	Kristal yapı	
Sınıf 6: Resimle gösterilemeyecek kadar küçük	Malzemenin kafes yapısı	
	Sınıf 1'den Sınıf 4'e kadar tüm yapıların süperpoze edilmiş hali	



Şekil 74. Sınıf 1'den 4'e kadar yüzey sapmaları

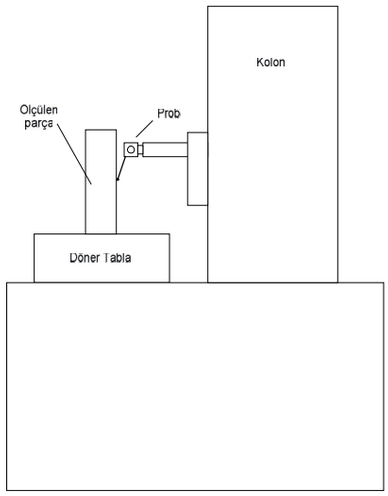
Form Ölçümlerinde Kullanılan Cihazlar

- Form ölçüm cihazları
- Özel form ölçüm cihazları (Örneğin dişli ölçümü için, krank mili ölçümü için vb.)
- Koordinat ölçüm cihazları
- Kontur ölçüm cihazları
- Profil projektörler

Genel maksatlı form ölçümleri konusunda en hassas ve doğru cihazlar “Form Ölçüm Cihazları” başlığı altındaki cihazlardır.

Form Ölçüm Cihazları

Form ölçüm cihazları, döner tablalı ve döner problu olmak üzere iki tiptedir. Döner tablalı form ölçüm cihazlarında (Şekil 75) ölçülecek parça cihaz tablasıyla birlikte dönerken, prob sabittir. Özellikle hafif ve uzun parçalar (şaft) için daha avantajlıdır. Döner problu form ölçüm cihazlarında ise tabla sabittir. Dolayısıyla ölçülecek parça ölçüm sırasında hareketsizdir. Bu özelliğinden dolayı ölçüm tablasından gelebilecek hatalar belisizliği etkilemeyecek kadar küçüktür. Ölçümler probun parça çevresinde hareket etmesiyle elde edilir. Bu tip cihazların bir faydası da ağır parçaların problemsiz ölçümüne imkan vermesidir [64].



Şekil 75. Form ölçüm cihazı

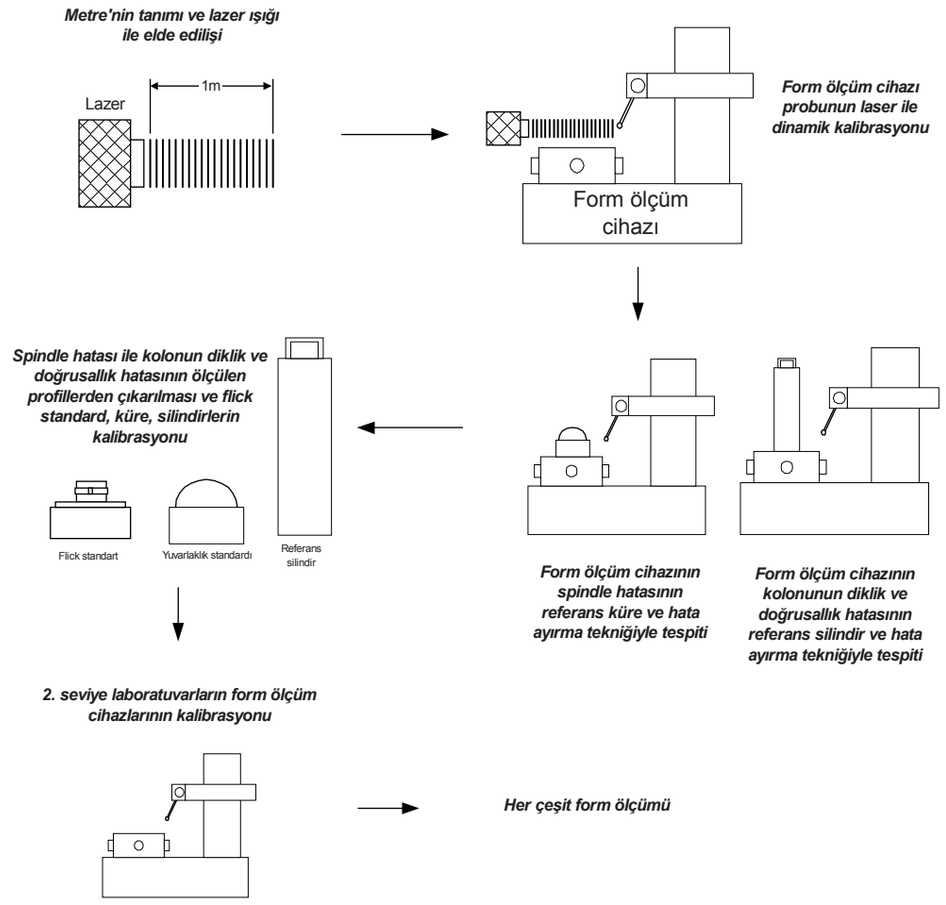
Kalibrasyon

Birincil seviyede form ölçüm cihazı kalibrasyonu: Form ölçüm cihazının referans döner tablası ve kolonu, hata ayırma tekniği kullanılarak kalibre edilir. Ayrıca cihazın probu bir lazer interferometre veya bir piezo konumlandırıcı ile kalibre edilir (Şekil 76) [65].

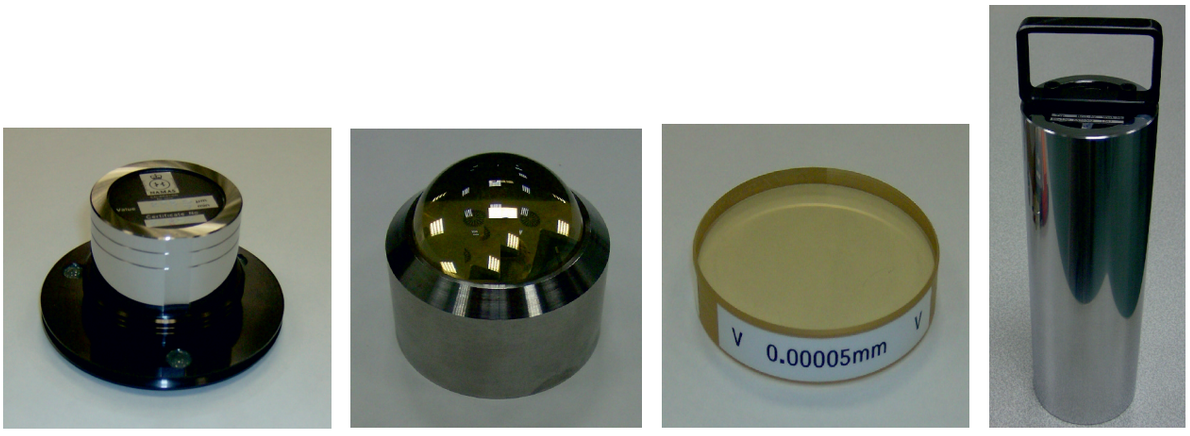
İkincil seviyede form ölçüm cihazı kalibrasyonu: Form ölçüm cihazının kalibrasyonu yuvarlaklık standardı, flick standart, referans silindir ve optik cam ile gerçekleştirilir (Şekil 76 ve Şekil 77). Yuvarlaklık standardı, yuvarlaklık sapması çok küçük mertebede olan bir zerodur yarıküre veya çelik küre olup, döner tablanın yuvarlaklık hatasını ortaya çıkarmaya yarar. Flick standart, üzerinde derinliği iyi bilinen bir çentik bulunan çelikten yapılmış silindirik bir parçadır. Prob, flick standart ile kalibre edilir (Aşağıda flick standart ölçüm profili görülmektedir (Şekil 78). Referans silindir, yüzeyinin silindiriklik sapması çok küçük mertebede; taban ve tavanına göre dikliği ile karşılıklı yüzeylerinin birbirine göre paralelliği çok iyi olan uzun, çelikten yapılmış bir silindirdir.

Cihazın kolonunun döner tabla eksenine paralelliğini, kolonun doğrusallık hatasını ve ayrıca döner tabla yuvarlaklık hatasının yükseklikle ne kadar arttığını ortaya çıkarmak için kullanılır. Optik cam ise yüzeyi ideal düzlükte olan zerodurdan yapılmış bir mastardır. Döner tablanın düşey salgısını ortaya çıkarmada kullanılır.

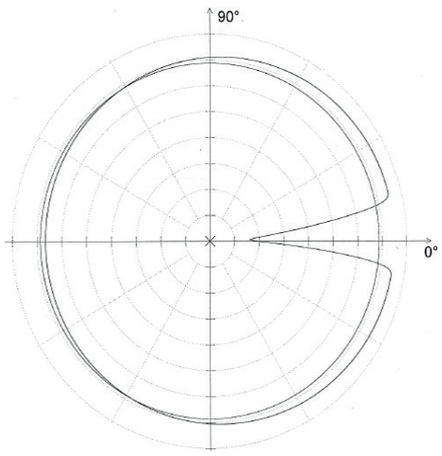
Aynı şekilde, bahsi geçen standartların kalibrasyonu da ikinci seviye kalibrasyon olarak, form ölçüm cihazlarıyla gerçekleştirilir.



Şekil 76. Form ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri



Şekil 77. Form ölçüm cihazını kalibre etmekte kullanılan standartlar



Şekil 78. Bir flick standart ölçüm profili (Radyal sapmalar yüzlerce kez büyütülmüştür.)

Üç Boyutlu Ölçümler

Gelişen sanayi ile birlikte koordinat ölçümleri, endüstriyel ölçümlerin en önemli parçalarından bir tanesi olmuştur. Birbirine dik olarak hareket eden üç eksene sahip ve üç boyutta ölçüm yapabilen ölçüm cihazlarına Koordinat Ölçme Cihazı (Coordinate Measuring Machine) adı verilir. Endüstride büyük ya da küçük üretim yapan kuruluşlar için CMM'ler en önemli cihazlardır. Daha çok otomotiv sektöründe ve bu sektöre bağlı yan sanayide üretilen kompleks parçaların ölçümlerinde CMM cihazları kullanılır.

Üç boyutlu ölçüm cihazları üç ana bölümden oluşur:

- Birbirine dik hareketli üç eksen
- Problama sistemi
- Kontrol ünitesi

Koordinat metrolojisinin temel fonksiyonu, ölçülecek parçanın gerçek şeklinin ölçülmesi, istenilen ölçülerle karşılaştırılması ve form ölçümlerinin yapılmasıdır. CMM cihazı ile ölçülecek parçaların gerçek boyutları ve şekilleri, probun yüzeylerin değişik yerlerine temas ettirilmesi ile elde edilir. Fakat alınan noktalarla boyut ölçüm sonuçları ya da form parametrelerini doğrudan hesaplamak mümkün değildir. Ölçülen parça ideal geometrik şekillere sahip olmadığı için, bu değerler alınan ölçüm noktalarına yaklaşık en uygun şeklin bulunmasıyla (best-fit uygulamasıyla) elde edilir.

- Ölçüm yüzeyinden alınan noktalardan bir ölçüm veri (data) seti yaratılır.
- Alınan bu noktalara göre ölçülecek parçanın belirtilen boyut, form ve konumu hesaplanır.
- Ölçüm sonuçları ile çizim değerleri karşılaştırılır.

Oluşan endüstriyel üretim talepleri nedeniyle, form ve boyut ölçümlerinin birleştirilmesi ile koordinat metrolojisi daha önemli hale gelmiştir. Üç boyutlu ölçüm cihazlarında; ölçülen parça referans sistemi esas alınarak aşağıdaki ölçümler yapılır.

- Boyutsal ölçümler
- Form ölçümleri

- Profil ölçümleri
- Dijitalize etme ve boyut modelleme
- Şaft ölçümleri
- Tersine mühendislik (Reverse engineering)

CMM tiplerinin ölçüm esnasında doğruluk, zaman ve fiyat gibi ihtiyaçların karşılanmasında önemli rolü vardır. Kullanılacak CMM cihazının tipi, kullanıcının ihtiyaçlarına göre belirlenir. Sabit kolon üzerinde hareketli, ileri ve geri hareket edebilen hareketli bir kiriş ve kirişe düşey hareket eden birinci eksene, prob sistemi bağlı olan CMM'lerdir. Sabit kolona bağlı olan birinci ve ikinci eksenler üçüncü eksene yatay hareket eder. Kiriş üzerinde hareket eden üçüncü eksen ise iş parçasının bağlandığı sabit ölçüm tablasına göre yatay olarak hareket eder.

Sabit Köprülü CMM (Fixed bridge CMM)

Sabit köprülü CMM'lerde, köprü cihaz yataklarına sabitlenmiştir (Şekil 79). Prob sistemi, sabit köprü üzerinde düşey hareket eden birinci eksene bağlanır ve ikinci eksenle birlikte sabit köprüye yatay hareket eder. Üçüncü eksen hareketi, ölçülecek parçanın bağlandığı ölçüm tablasının CMM tabanına göre yatay hareketidir.



Şekil 79. Sabit Köprülü CMM [66]

Kolon CMM (Column CMM)

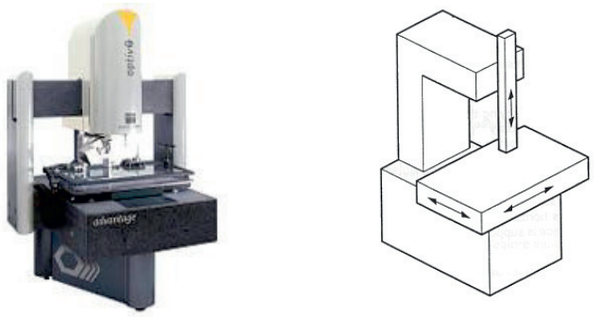
İki hareketli eksene sahip, prob sistemi cihaz ölçüm tablasına dik olan ve düşey hareket eden birinci eksene bağlanmıştır (Şekil 80). İkinci eksen bileşenleri iş parçası üzerine bağlanan ve yatay düzlemde hareket eden ölçüm cihazlarıdır.



Şekil 80. Kolon CMM [67]

Hareketli Mesnetli Yatay Kollu CMM (Moving Ram Horizontal Arm CMM)

Birbirine dik ve hareketli üç eksen bileşenine sahip, prob sistemi ikinci eksene göre yatay hareket eden eksene bağlı, birinci ve ikinci eksenleri üçüncü eksene dik hareket eden, üçüncü eksen cihaz ölçüm tablasına göre yatay hareket eden cihazlardır (Şekil 81).



Şekil 81. Hareketli mesnetli yatay kollu CMM [67]

Gantry CMM

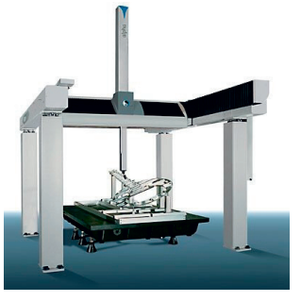
Çok büyük iş parçalarının ölçülmesinde kullanılan CMM'lerdir ve çok büyük ve ağır parçaların ölçülmesinde burulmadan kaynaklanan hataların sınırlandırılması (limitlendirilmesi) için tasarlanmıştır (Şekil 82). Birbirine dik üç hareketli eksen bileşenine sahip, prob sistemi ikinci eksene dik hareket eden birinci eksene bağlanmış, birinci ve ikinci eksen bileşenleri üçüncü eksene göre yatay hareket edebilen, üçüncü ekseni cihaz ölçüm tablası üzerinde yükseltilmiş yatay raylar üzerinde hareket eden cihazlardır.

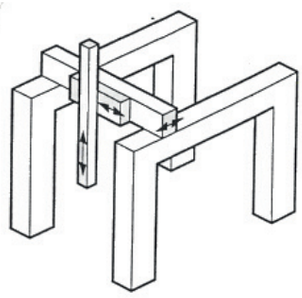


Şekil 82. Gantry CMM

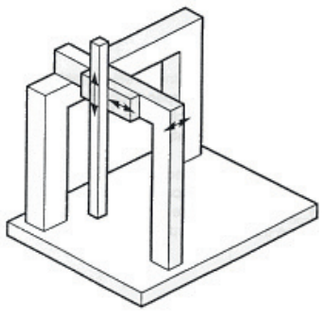
L-Şeklinde Köprülü (L-shaped bridge CMM)

Sabit tabla üzerinde kirişli CMM'lerin biraz daha değiştirilmiş ve büyük tipidir (Şekil 83). Birbirine dik üç hareketli eksen bileşenine sahip, prob sistemi ikinci eksene dik hareket eden birinci eksene bağlanmış, birinci ve ikinci eksen bileşenleri üçüncü eksene göre yatay hareket edebilen, üçüncü eksen bir tanesi ölçüm tablası yüzeyi üzerinde ve bir tanesi de tabla üzerinde yükseltilmiş iki yatak üzerinde hareket eden cihazlardır (Şekil 84).





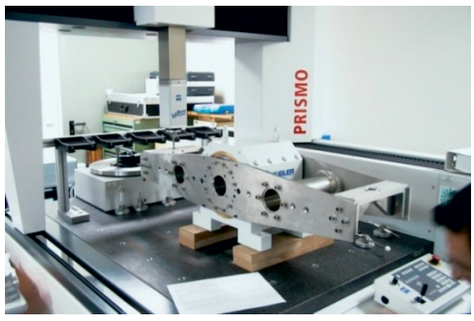
Şekil 83. L-Şeklinde köprülü CMM



Şekil 84. Hareketli köprülü CMM

Hareketli Köprülü CMM (Moving bridge CMM)

Köprülü CMM (Moving bridge CMM), endüstride en yaygın kullanılan CMM çeşididir (Şekil 85). Ölçümü yapılacak parçanın bağlandığı, sabit ölçüm tablası üzerinde hareketli iki kolon üzerinde köprü olan ve üç eksende birbirine dik hareket eden CMM'lerdir. Prob sistemi, iki kolon arasında hareket eden, ölçüm tablasına dik eksene bağlanmıştır ve bu eksen köprü üzerinde düşey hareket eder.



Şekil 85. Köprülü tip CMM [66]

CMM Kalibrasyonu

CMM cihazlarının kalibrasyonları üretici tarafından yapılarak hataları çıkarılır ve CMM yazılım kullanılarak kompanze edilerek düzeltilir. Hata değerlerinin üretici firma tarafından verilen tolerans değerlerin içerisinde olması gerekir. Doğrulama testleri belirlenen periyotlarla tekrarlanır ve cihazın daha doğru çalışması sağlanır. Bu testler uluslararası standart ISO 10360'a göre yapılır. ISO 10360 aşağıda sıralanan beş bölümden oluşur.

- ISO 10360-1: Geometrical Product Specifications - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)-Part 1: Vocabulary
- ISO 10360-2: Coordinate Metrology-Part 2: Performance assessment of coordinate measuring machines
- ISO 10360-3: Geometrical Product Specifications - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)-Part 3: CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis
- ISO 10360-4: Geometrical Product Specifications - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)-Part 4: CMMs used is scanning measuring mode
- ISO 10360-5: Geometrical Product Specifications - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)-Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems.

CMM cihazı üretildikten sonra fabrika ayarları yapılırken skala hataları lazer interferometre yardımı ile bulunur ve düzeltilir. Kullanılacağı yere yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler daha çok verifikasyona yönelik ölçümlerdir. Bu yüzden ölçüm sonunda bulunan değerler düzeltme dosyasına yazılarak cihazın hatası toleransların altına çekilebilir. Bu ölçümler sırasında çoğunlukla (üreticiye göre değişir) mastar blokları, halka mastarlar, küre mastarlar ve üreticinin tavsiye ettiği adım mastar, küre-delik plaka veya özel olarak imal edilmiş üzerinde farklı standartlar (Küre, halka mastar, mastar blokları, flick standart vb.) bulunan özel üretim standartlar kullanılır (Şekil 86). Yapılan ölçüm sonunda bulunan hatalar düzeltmeye rağmen cihazın toleransları içerisinde değilse o zaman fabrika ayarlarına dönülmeli ve fabrikada yapılan ölçümler, lazer interferometre ölçümleri dahil yapılmalıdır.

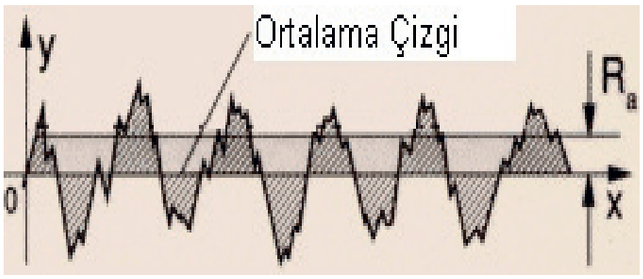


Şekil 86. CMM kalibrasyonunda kullanılan özel mastarlar

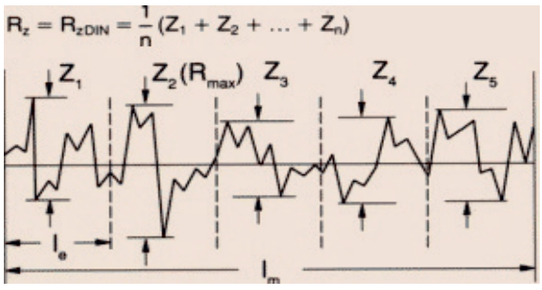
Yüzey Pürüzlülüğü ve Nanometre Mertebesindeki Ölçümler

Doğada hemen hemen hiçbir cismin yüzeyi tam olarak düz değildir. Düz olduğunu zannettiğimiz yüzeylerde, daha ayrıntılı bir inceleme imkanı bulmuş olsak yeni yüzeysel sapmalar fark edebiliriz. İmalat sanayi üzerinde yoğunlaşırsak, örneğin bir motor krank mili yüzeyi son derece parlak ve pürüzsüz görünümlüdür. Ancak bir pürüzlülük ölçüm cihazıyla incelenirse yüzey sapmaları büyütülerek görülür. Bu sapmalar çalışan makine parçasının fonksiyonu üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu sebeple hassasiyetle ölçülmesi gerekir. Endüstride bu konuda yaygın olarak kullanılan cihazlar iğne uçlu indüktif pürüzlülük ölçüm cihazlarıdır [68][61].

Pürüzlülük ölçümleri, cisimlerin yüzey yapısının mikro ölçekte incelenebilmesi için yapılır. Yüzeyde alınan ölçümlerle yüzeyin profilleri elde edilir. Bu profillerde çok sayıda pürüzlülük parametresi hesaplanır. Genellikle her parametre yüzeyin farklı bir istatistiksel özelliğini ifade eder. Örneğin R_a, R_z ve R_{max} (Şekil 87 ve Şekil 88) yaygın olarak kullanılan parametrelerdir [69]. Pürüzlülük ölçümlerinde "numune uzunluğu" denen ve incelenecek max yüzey sapması dalga boyunu ifade eden bir uzunluk değeri esas alınır. Numune uzunluğundan daha uzun dalga boyuna sahip yüzey sapmaları pürüzlülük olarak değerlendirilmez. Pürüzlülük ölçümü genellikle ardışık 5 numune uzunluğu boyunca alınır. R_a parametresi, pürüzlülük profilinde ortalama çizgiden sapmaların mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. R_z parametresi, ardışık 5 numune uzunluğundaki en büyük tepe-çukur derinliklerinin ortalamasıdır. R_{max} ise bunlardan en büyük olanıdır.

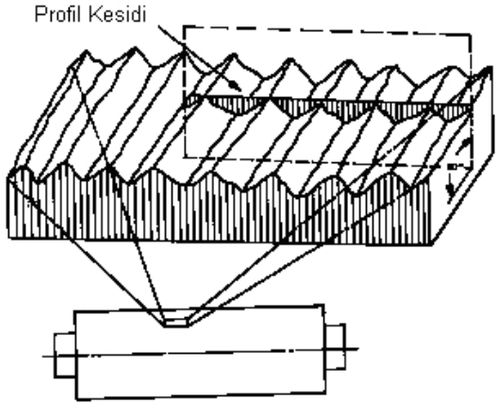


Şekil 87. R_a parametresi

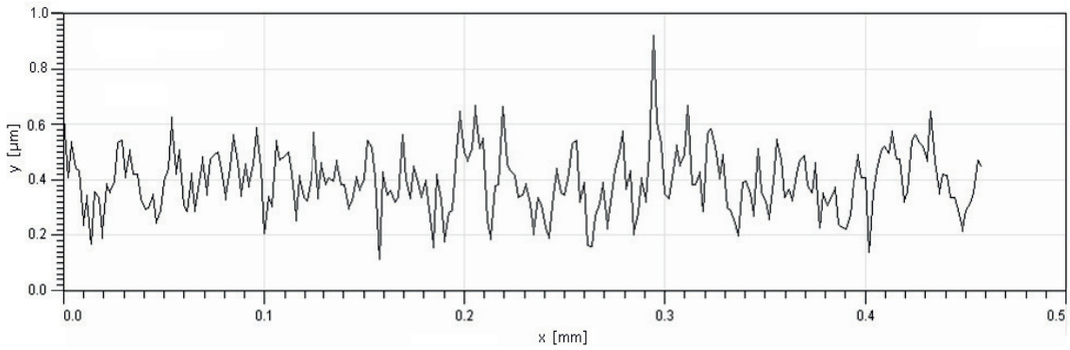


Şekil 88. R_z ve R_{max} parametreleri

İmalat sanayinde pürüzlülük ölçümleri büyük öneme sahiptir. Üretilen parçaların yüzeylerinin sürtünme ve aşınma durumu; yorulma özellikleri ve yansıma özellikleri pürüzlülük parametreleriyle yakından ilgilidir. Aşağıda, bir parçanın üzerinde pürüzlülük profilinin nasıl elde edildiği ve tipik bir pürüzlülük ölçümü grafiği görülmektedir (Şekil 89 ve Şekil 90).



Şekil 89. Bir iş parçasının üzerinde pürüzlülüğün değerlendirileceği profilin tespiti (Genellikle işleme izlerine dik kesit alınır.)



Şekil 90. Tipik bir pürüzlülük ölçüm grafiği
(Yüzeye dik yöndeki sapmalar yüzlerce kez büyütülmüştür.)

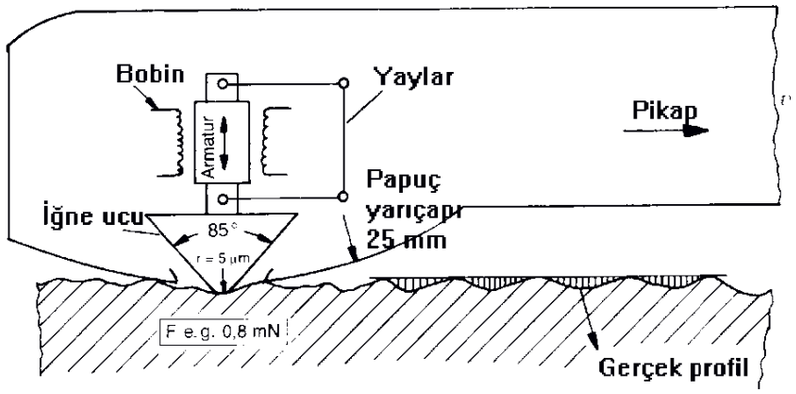
Pürüzlülük Ölçüm Cihazları ve Metodları

Pürüzlülük ölçümü maksadıyla genel olarak temaslı ve temassız metodlar kullanılır. Temassız metodlar optik metodlar olup, genellikle yüzeyin mikroskop altında düşey veya eğimli olarak incelenmesidir. Yüzeyin eğimli incelenmesiyle yüzey profili de kısmen elde edilebilir. Diğer bir optik metod ise yüzeye gönderilen ışığın, saçılma açılarının incelenmesiyle pürüzlülük hakkında dolaylı bilgi edinilmesidir (Ligth scattering). Ayrıca, farklı ışık kaynakları kullanılarak, yüzeyin ideal düzlükteki bir referans ayna ile karşılaştırılması esasına dayanan çeşitli interferometrik metodlar mevcuttur. Bu metodlarla 3 boyutlu pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilir.

Temaslı pürüzlülük ölçüm metodları ise, yüzeye temas eden elmas bir iğneyle yüzey profilinin elde edilmesine dayanır. Önceleri tamamen mekanik olan bu tip cihazlar, sonraları, iğnenin düşey hareketini indüktif veya kapasitif olarak elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlara dönüşmüştür. Bunların dışında, bir nozülden ve yüzeye çok yakın bir mesafeden basınçlı hava göndermek suretiyle yüzeyde hava filmi oluşturmaya dayanan pnömatik metodlar mevcuttur. Hava filmindeki basınç dalgalanmalarının ölçülmesiyle dolaylı olarak pürüzlülük parametreleri elde edilmektedir.

İğne Uçlu İndüktif Yüzey Ölçüm Cihazları

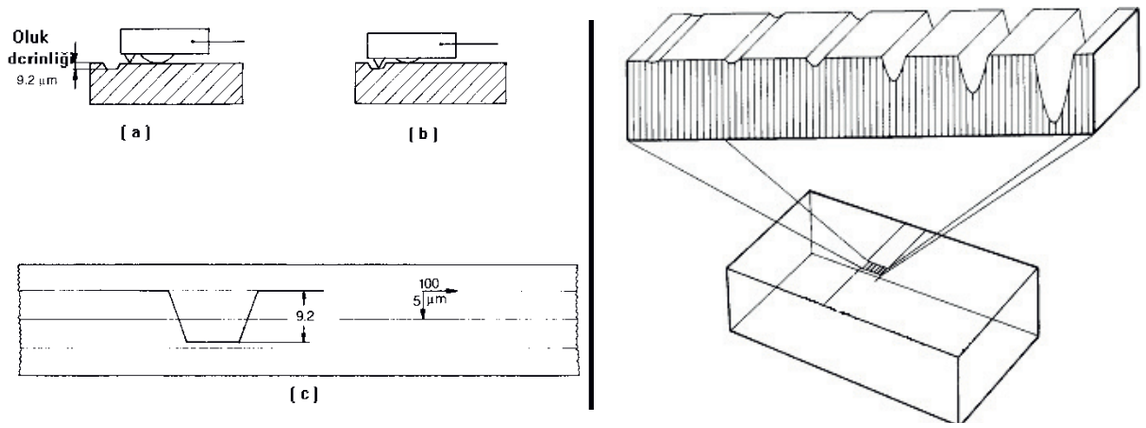
Bu cihazda “pikap” denilen elemanın içinde, uç yuvarlaklık yarıçapı çok küçük (1-2 µm) olan bir elmas uçlu iğne bulunur (Şekil 91). Pikap sabit hızlı bir hareket ünitesi yardımıyla yüzey üzerinde hareket ettirilirken iğne tepe ve çukurları takip ederek düşey bir hareket yapar. Bu hareket indüktif olarak elektrik sinyallerine dönüştürülür. Daha sonra bu sinyaller istenirse filtrelerden geçirilerek dalga boyuna göre ayrılır.



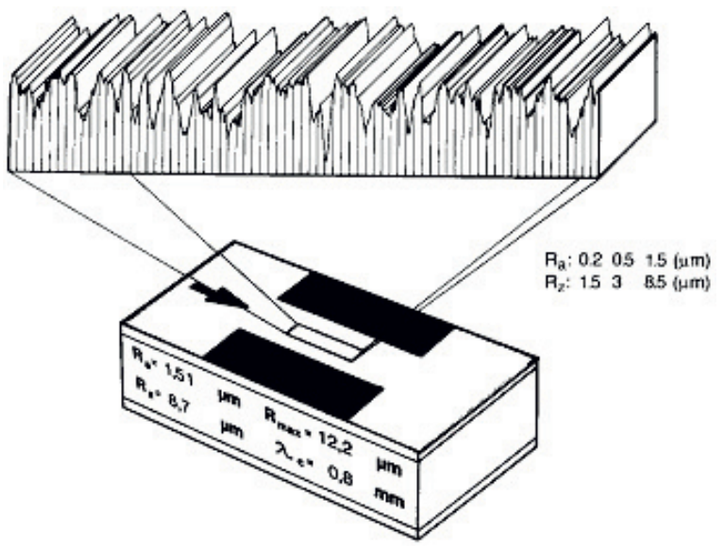
Şekil 91. İğne uçlu indüktif yüzey ölçüm cihazları

Kalibrasyon

İkincil seviyede pürüzlülük kalibrasyonu: İğne uçlu indüktif yüzey ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, gelişmiş cihazlarda derinlik standardı (veya hassas küre), pürüzlülük standardı; daha basit cihazlarda ise sadece pürüzlülük standardıyla gerçekleştirilir. Derinlik standardı, üzerinde derinliği kesin olarak bilinen bir veya daha çok sayıda oluk içerir (Şekil 92). Pürüzlülük standardı ise ya ideal geometrik şekillere sahip (üçgen, sinüs dalgası gibi) ya da rastgele karakterde yüzeylerdir (Şekil 93). Bu standartların kalibrasyonu ikinci seviye kalibrasyon olarak iğne uçlu indüktif yüzey ölçüm cihazlarıyla gerçekleştirilir [61].

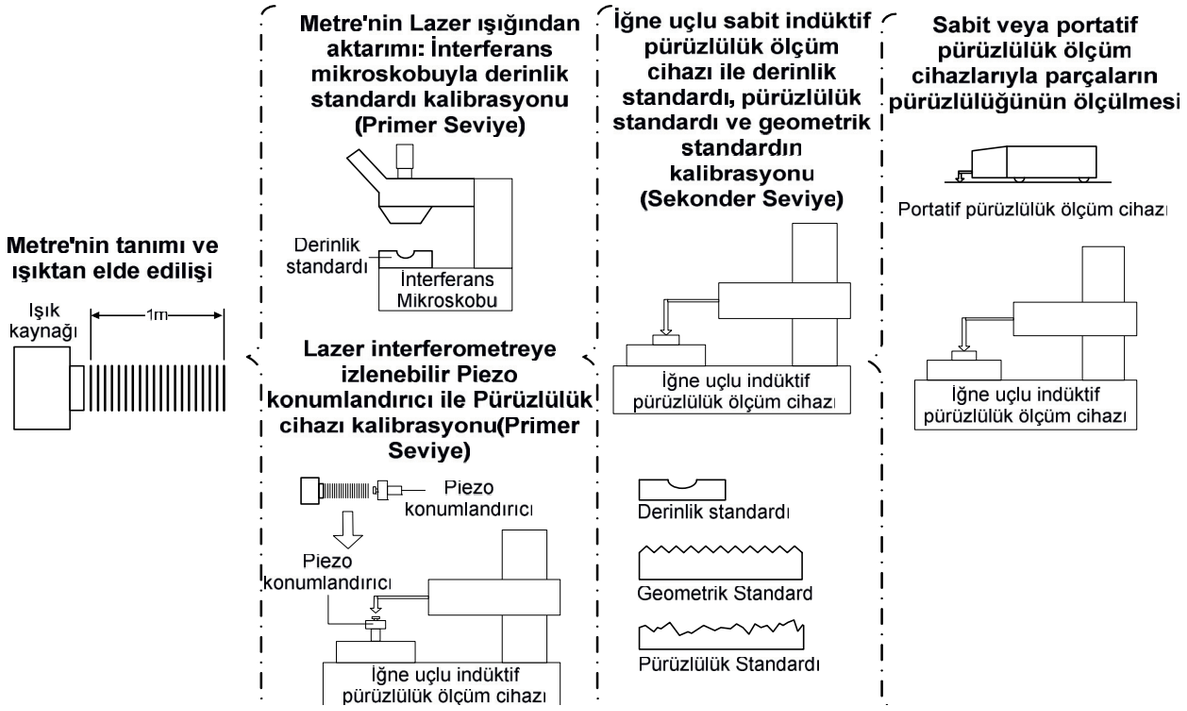


Şekil 92. Derinlik standartları



Şekil 93. Pürüzlülük standardı

Birincil seviyede pürüzlülük kalibrasyonu: Derinlik standardı bir interferans mikroskobunda kalibre edilir veya iğne uçlu indüktif yüzey ölçüm cihazı bir piezo konumlandırıcı ile kalibre edilir (Şekil 94). Ayrıca pürüzlülük ölçüm düzeneğinde oluşan titreşim/gürültüyü tespit etmek için ideal düzlükte bir yüzey olan optik cam kullanılır (Şekil 95).



Şekil 94. Pürüzlülük ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri



Şekil 95. Pürüzlülük ölçüm düzeneğinde oluşan titreşim/gürültüyü

Çizgi Skalalı Ölçme Standartları

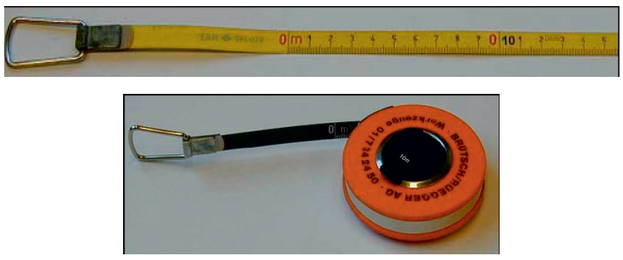
Çizgi skalalar günümüzde endüstride, imalat sektöründe, ölçme laboratuvarlarında, bilimsel çalışmalarda, nanoteknolojide, litografide, nanometrolojide farklı versiyonları ile kullanılır [70]. Fakat çizgi skalaları, birinci seviye standart olan kararlı lazerler ile kalibre edilmek zorundadır.

Çizgi skalalı ölçme standartları endüstride yaygın olarak birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu standartlar genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir [71][72]:

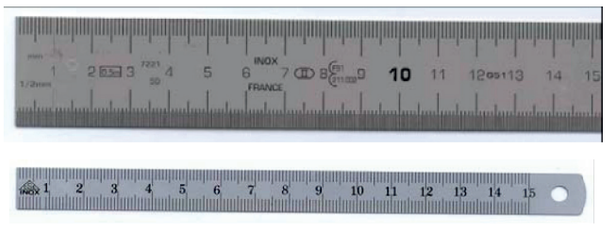
1. Çelik cetvel ve şerit metreler
2. Tek ve iki boyutlu cam cetveller
3. Adım (Stage) mikrometreler (Mikroskopların kalibrasyonunda kullanılan)
4. CMM ve üniversal ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan hassas çizgi skalaları
5. Video görüntülü optik ölçüm cihazları ve mikroskop kalibrasyonlarında kullanılan çizgi skalalı standartlar
6. Nano teknolojide kullanılan skalalar

Çelik Cetvel ve Şerit Metreler

Şerit metre (Şekil 96) ve çelik cetveller (Şekil 97), boyutsal ölçümlerde izlenebilirliğin endüstriye aktarılabilmesi için kullanılan temel ölçme ekipmanlarıdır. Şerit metre ve çelik cetvellerin kalibrasyonu mutlak veya karşılaştırma metodu ile yapılır. Mutlak yöntemde, çizgi skala aralıkları referans standart ile doğrudan ölçülür. Karşılaştırma metodu ise referans standart ile kalibre edilmiş bir standart ile ölçülmek istenen metrenin aynı pozisyonlarda karşılaştırması esasına dayanır. Öncelikle kullanılacak olan referans metrenin izlenebilirliğinin temini amacı ile bir üst referans ile (lazer interferometre) kalibre edilmesi gerekir. Kalibre edilen referans şerit metre ile ölçülecek test şerit metresi uygun bağlama ve gerekiyorsa gerdirme işlemleri ayarlandıktan sonra belirlenen ölçüm adımlarında karşılaştırılarak kalibrasyon işlemi gerçekleştirilir [71][72].



Şekil 96. Şerit metreler

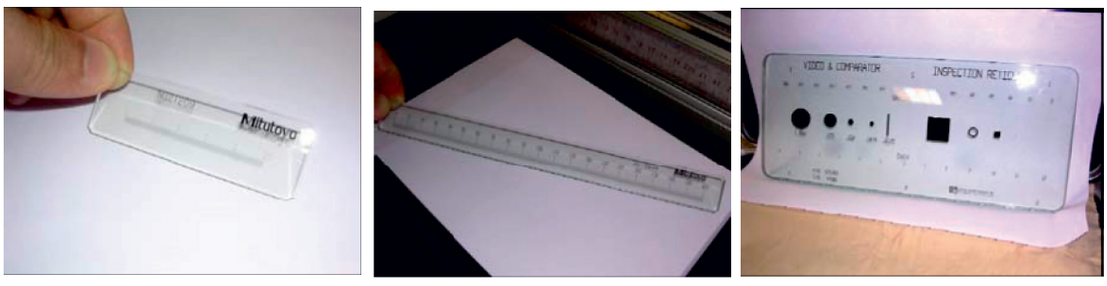


Şekil 97. Atölye cetvelleri

Bu ekipmanlar uluslararası yasal metroloji kapsamına girdikleri için, OIML R35 standartlarında belirtilen sınıf değerlerine göre imal edilirler. Ayrıca 73/362/EEC nolu Avrupa standartları ve direktiflerinde de sınıf ve üretim durumları belirtilmektedir.

Tek ve İki Boyutlu Cam Cetveller

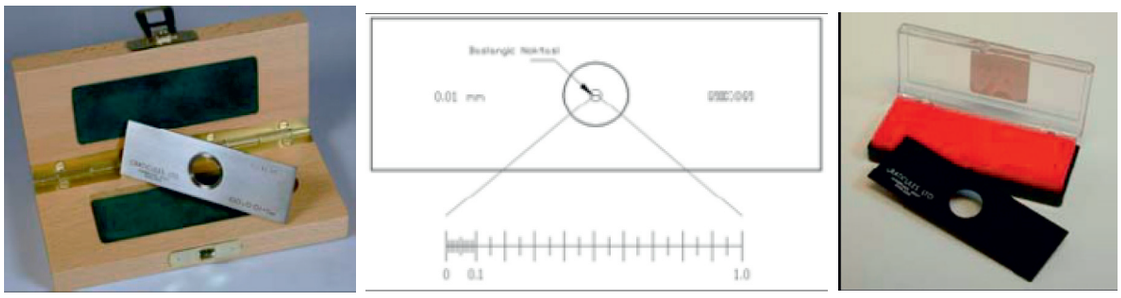
Cam cetveller, tek veya iki boyutlu amaca yönelik olarak imal edilmiş olabilirler ve tek veya iki boyutlu olarak hareket edebilen ölçme cihazlarının, optik profil projeksiyon cihazlarının ve mikroskopların kalibrasyonlarında kullanılan ölçme standartlarıdır (Şekil 98). Bu cihazların çözünürlükleri genellikle 0,5 mm, 1 mm veya 5 mm olabilir [72].



Şekil 98. Tek ve iki boyutlu cam skala örnekleri

Adım Mikrometreleri (Stage micrometer)

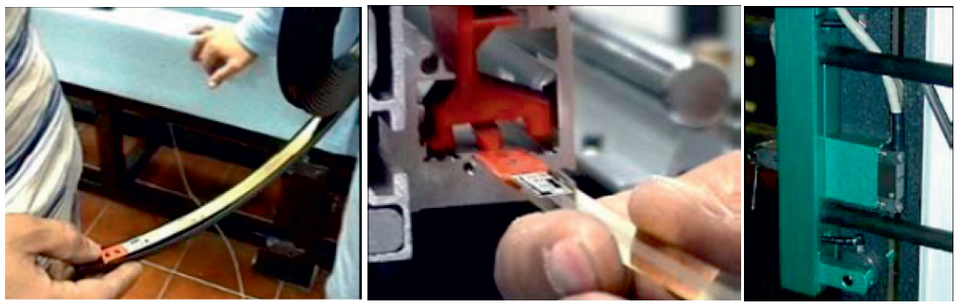
Adım mikrometreleri, temassız ölçüm sistemleri olan sertlik ölçme cihazlarının skalalarının kalibrasyonlarında referans standart olarak kullanılır (Şekil 99). Ayrıca muhtelif büyütme oranlarına sahip mikroskop cihazlarının mesafe ölçme sistemleri de bu standartlar ile kalibre edilebilir. Bu cihazların yaygın kullanımda olanlarının çözünürlükleri ise 0,010 mm olmaktadır [72].



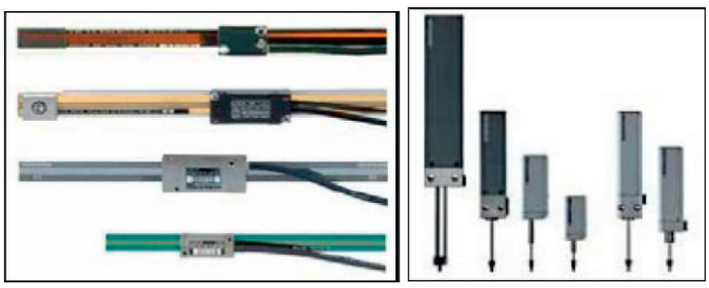
Şekil 99. Adım (stage) mikrometresi örnekleri ve kullanıldığı sertlik ölçme cihazı

Hassas Çizgi Skalaları (linescales)

Hassas çizgi skalaları (Şekil 100 ve Şekil 101) endüstride yaygın olarak kullanılır. Oldukça düşük çözünürlüklere ulaşabilen yüksek doğruluk değerlerinde tipleri bulunmaktadır. Uzun mesafe değerlerinde çalışabilen tek parça halinde imal edilmiş ve 0,1 µm çözünürlüğe ulaşabilen hassas çizgi skalaları endüstride kullanılır. İmalat sektöründe freze tezgâhlarının eksenlerinin hareketlerinin uzunluk değeri olarak tespitinde de bu skalalar kullanılmaktadır. CMM tezgâhlarının eksen hareketlerinin uzunluk değeri olarak ölçülebilmesi de bu skalalar sayesinde gerçekleştirilir.



Şekil 100. Linescale kullanılan 5 m BENCH ve form cihazı üzerindeki görünümü

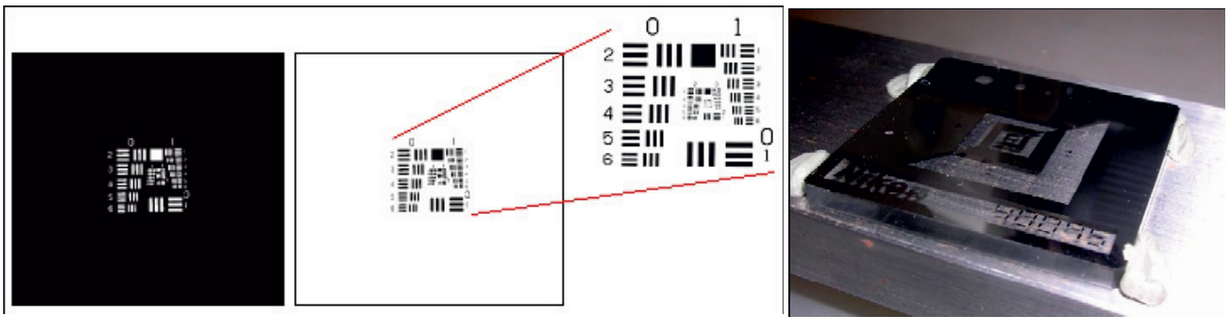


Şekil 101. Optik okumalı linescale ve linescale kullanabilen prob örnekleri

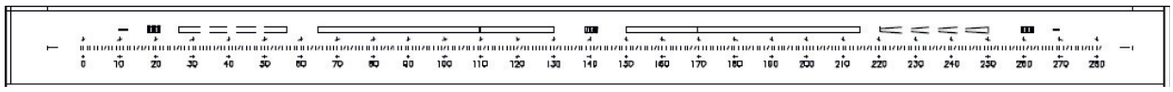
Üretildikleri malzemeler; çelik, invar, cam, quartz veya zerodur olabilir. Lazer interferometre kullanılarak düşük belirsizlik değerleri ile kalibrasyonları gerçekleştirilir.

Çizgi Skalalı Standartlar

Video görüntülü cihazlarda veya mikroskop cihazlarında, cihazın okuyabileceği en küçük çözünürlüklerin bulunmasında, cihazda lens değişimleri esnasında oluşabilecek büyütme hatalarının tespitinde veya kamera piksel büyüklüklerinin tespitinde, kullanılan çizgi skalalı standartlardır (Şekil 102 ve Şekil 103) [72].



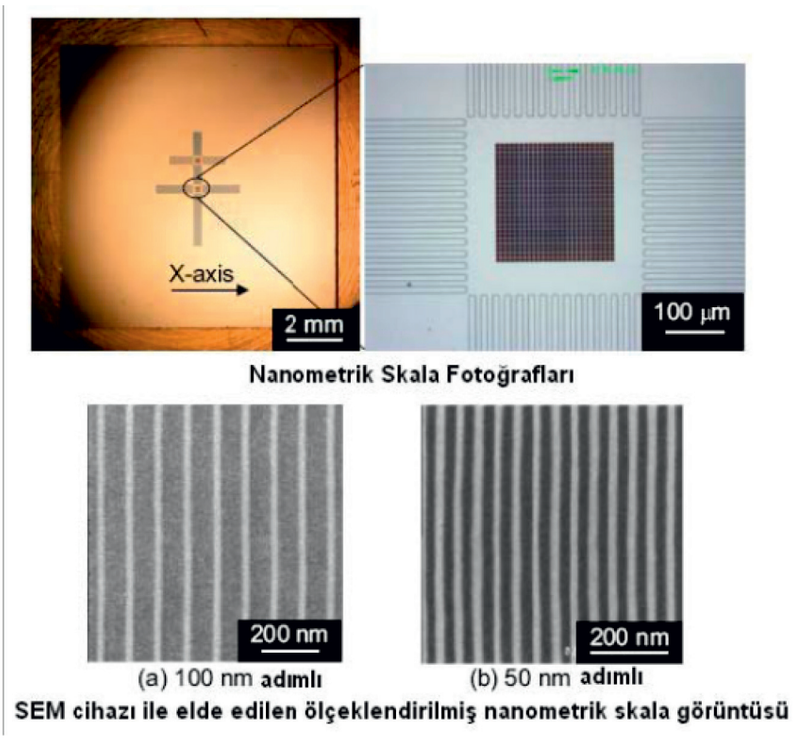
Şekil 102. Çözünürlük hedefleri



Şekil 103. Hassas cam skala

Nanometrik Skalalar

Nano teknolojide geniş kullanım alanı olan, elektron mikroskoplarının (SEM, AFM, TEM gibi) kalibrasyonunda "nanometrik skalalar" kullanılır. Aşağıda çeşitli ölçme aralıklarına sahip nanometrik skalalara örnekler verilmiştir (Şekil 104).



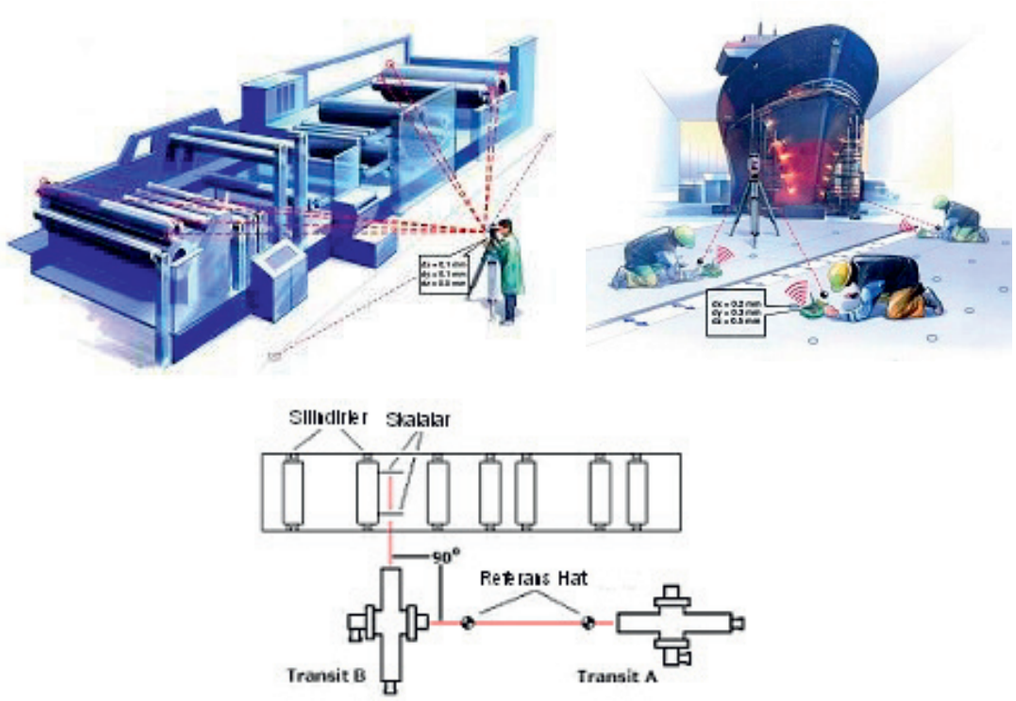
Şekil 104. Nanometrik skalalar

Tek ve iki boyutlu cam cetvel kalibrasyonları genelde MASK ölçüm sistemi gibi özel ekipmanlar ile gerçekleştirilir. MASK ölçüm sisteminde, düzlemselliği oldukça düşük granit tabla üzerinde hava yastığı sayesinde piezo-nanomotorlar yardımı ile hareket edebilen iki boyutlu özel bir X/Y tablası bulunur. Diferansiyel lazerler mesafe okumasını, piezo-nanomotorlar ise sistemi hareket ettirerek pozisyonlamayı sağlar. Referans cihaz lazer diferansiyel interferometredir. Sistemin sahip olduğu hava yastıkları üzerinde piezo-nanomotorlar sayesinde hareket eden tablanın hareketleri iki adet (X ve Y eksenleri için) lazer diferansiyel interferometre ile ölçülebilir. Dört adet ultrasonik piezo nanomotorla hareket ettirilen X/Y tabla, hava yastıklı granit masa üzerinde bulunur. X/Y tabla, sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesi için zerodur malzemeden yapılmış ve granit masa üzerine kinematik prensibe göre oturtulmuştur. Bunun yanında sisteme bağlı yüksek büyütme oranındaki objektiflere sahip CCD dijital kamera bağlı mikroskop yardımı ile ölçülecek çizgi skala standardının görüntüsü, geliştirilen özel bir yazılım üzerinde aynı anda elde edilebilir. Bu sayede oldukça detaylı bir görüntü üzerinde doğruluğu ve çözünürlüğü yüksek bir sistem ile düşük belirsizliklerde kalibrasyon yapma imkanı elde edilir. Benzer çalışmalar birçok ülkedeki ulusal metroloji enstitüsü ve boyut ölçümleri laboratuvarlarında bulunur.

Topografik ve Endüstriyel Ölçümler

Boyutsal metrolojisinde makro boyutta ölçüm yapan cihazlar arasında optik takımlama ekipmanlarının yeri büyüktür (Şekil 105). Optik takımlar, makine montajlarında (Gemi, fabrika paralel bantları vb.) konum, pozisyon veya paralellik, diklik gibi geometrik tolerans ölçümlerini içine alan geniş bir yelpazede kullanılırlar. Arazi ölçümü ve haritalama işlemlerinde de yaygın olarak kullanılır.

Optik takımlama cihazları olarak; teleskoplar, optik kolimatörler, nivolar, jig-tarnsitler, theodoliteler ve total stationlar sayılabilir. Bunlar arasından thedolitler, nivolar ve total stationlar arazi ölçümlerinde kullanıldıkları için arazi ölçüm cihazları olarak da adlandırılırlar. Endüstriyel ölçümlerde kullanılan cihazlar ile aralarında hassasiyet faklılığı vardır.



Şekil 105. Optik takımlama cihazları kullanımına örnek [73][74]

Teleskop ve Kolimatörler

Optik takımlama cihazları arasında referans olarak kullanılan en hassas temel cihazlar teleskoplar ve kolimatörlerdir. Teleskoplar ve kolimatörler sayesinde, optik takımların kullanılma temelini oluşturan optik referans (line of sight) çizgi oluşturulur. Bu eğilmez sanal çizgi sayesinde optik sistemlerle hassas ölçümler yapılabilir.

Teleskoplar optik sistemlerin temelidir. Bu cihaz mercek mekanizmalarıyla donatılmış bir tüpten oluşan ve objeleri uzayda bir yere yerleştirerek, netleştirme ve büyütme yapabilen optik bir sistemdir. Teleskoplar ışığın üç önemli özelliği; ağırlıksız oluşunu, mükemmel düzlemselliğini ve sınırsız oluşunu kullanırlar. Optik cihazların tamamında teleskoplar kullanılır.

İçerisinde faklı mesafedeki hedefleri odaklama amacıyla bir odaklama mekanizması ve merceği bulunur. Odaklama merceğinin arkasında, teleskobun sonunda cam üzerinde (çoğunlukla (+) işaretli) bir hedef yerleştirilir. Bakılan cismin uzaklığına göre odaklama yapılarak cismin görüntüsü hedef üzerine düşürülür. Böylece cisim üzerinde herhangi bir yer hedeflenerek işaretlenebilir. Farklı mesafelerdeki cisimlere bakıldığında gözün farklı mesafelere odaklanmasına gerek kalmaz, çünkü cismin görüntüsünün hedef üzerine düşmesi sağlanır. Büyütülen ve hedef üzerine düşürülen cisim sayesinde yüksek doğrulukla hassas ölçümler yapılabilir.



Şekil 106. Her iki eksende ölçüm yapabilen mikrometrelere sahip ayar teleskopu ve her iki eksende ölçüm yapabilen optik mikrometre [75]

Ayar teleskopları (Şekil 106) referans çizgi teleskoplarının ucuna, ölçüm yapabilmek için optik mikrometre yerleştirilmiş olanlarıdır (Şekil 107). Optik mikrometreler, basit bir mekanizmayla, içlerinde bulunan optik camı küçük bir açı ile referans çizgiye dik kaydırarak ölçüm yaparlar. Optik cam sayesinde referans çizgi kendisine paralel olarak kaydırılır. Bu sayede bakılan noktada doğrudan fark ölçülebilir.



Şekil 107. Cihazlarda bulunan hedef örnekleri ve her iki eksende ölçüm yapabilen optik mikrometre [75]

Teleskop ve kolimatörler birbirlerine benzeyen cihazlardır. Aralarındaki temel farklılık teleskopların göz ile içerisinden bakılabilecek bir mekanizmaya sahip olmamalarıdır.

Kolimatörler paralel ışın yayan ve yönelten, ayarlamalarda ve açı ölçümlerinde kullanılan cihazlardır. Kolimatörlerde bir adet objektif lens, hedef ve hedefin arkasında aydınlatma ışığı bulunur. Aydınlatma sayesinde hedefin görüntüsü objektif üzerine referans çizgiye paralel olarak düşer. Ayrıca kolimatörden dışarıya ve sonsuza kadar paralel olarak yansır.

Sonsuza odaklanmış ve arkasına ışık yerleştirilmiş teleskoplar da kolimatör olarak kullanılabilirler. Sonsuza odaklanmış bir teleskopla kolimatöre bakıldığı zaman mesafe ne olursa olsun hedefin büyüklüğü değişmez. Bu özellik kolimatörleri optik ölçümlerde kullanışlı hale getirir. Kolimatörlerin ve teleskopların gövdesini oluşturan silindirler yuvarlaklık değerleri düşük olarak imal edilirler. Merceklerin ve silindirin ekseninin, hedef kolimatöre yerleştirilirken, referans eksene paralel olmasına dikkat edilir.

Bazı kolimatörlerde özellikle optik ölçümlerde kullanılan kolimatörlerde birden fazla hedef (Şekil 108) bulunur. Hedefler genellikle 0'dan sonsuza kadar çeşitli odak mesafelerinde farklı hedefler olarak sıralanırlar. Optik sistemlerin odaklama özelliklerinin ve kolimasyon hatalarının kontrolü sırasında da kullanılırlar. Optik cihazların farklı odak mesafelerinde referans çizginin doğrusallık değişimi gözlenebilir. Bu tip kolimatörlerde öndeki "0" hedefi ile sonsuz hedefi çakıştırılarak ayar yapıldığında diğer hedefler aynı çizgi üzerine dizilirler.



Şekil 108. Kolimatörler

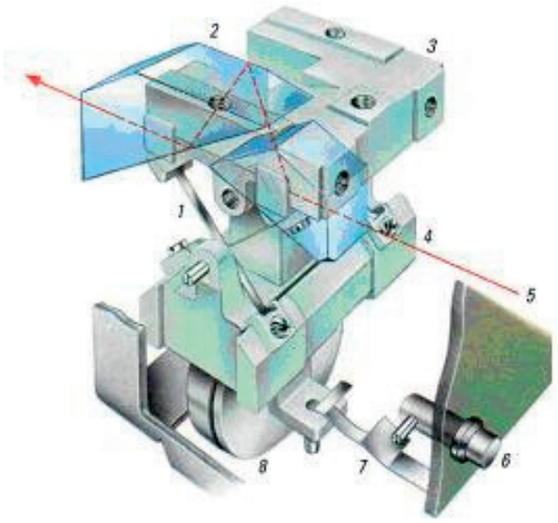
Nivolar

Su terazileri yatay referans çizgisini bulmakta kullanılır fakat ölçüm yapabilmek için daha fazlası gereklidir. Su terazisi ve teleskop bir arada kullanıldıklarında elde edilen en basit arazi ölçüm aracı, nivolardır. Nivoların esas görevi gerçek yatay düzlemi oluşturmaktır. Yerçekimi istikametine dik bir referans çizgi oluşturulmasında kullanılırlar.



Şekil 109. Otomatik nivo [53], hassas nivo [75]

Nivolar (Şekil 109) sabit bir noktadan çevrilerek referans çizgiyi 360° derece taşıyabilecek şekilde imal edilirler. Böylece yerdeki sabit bir noktadan her istikamete çevrilerek düzeçleme ve kot farklarını rahatlıkla değerlendirme imkanı sağlarlar. Genel olarak arazilerde yatay düzlemi oluşturmak ve kot farklarını bulmakta kullanılırlar. Hassas olanları endüstride büyük makine ve cihazların montajında da kullanılmaktadır. Bazı nivolar düzeçleme işini otomatik olarak yapabilen prizmaları taşıyan sarkaç sistemlerine (kompansatör) sahiptir (Şekil 110).



Şekil 110. Otomatik nivolarda kompansatör sistemi [73]

Transitler

Yatay ve dikey eksenlerde hareket yeteneği kazandırılmış teleskoplardır. Üzerlerinde hassas su terazisi bulunur. Transitlerde zaman zaman teleskop yerine otokolimatör de kullanılır. Genellikle endüstride makine montajında ve hassas parçaların konumlandırılmasında kullanılırlar.

Transitlerin biraz gelişmiş olanları jig-transitlerdir (Şekil 111). Transitlere göre yatay ve dikey eksenlerde daha hassas yataklara sahip oldukları için eksenlerin birbirlerine diklikleri daha iyidir. Optik mikrometre takılabilir ve ölçüm yapılabilir. Transit square veya optical transit square olarak da adlandırılırlar. Yatay ve düşey eksende açı enkoderleri olmadığı için açı ölçümü yapma yetenekleri yoktur.

Özel mekanizma ve aydınlatma sayesinde otokollimatör özelliği de kazandırabilirler. İki ayrı yüzeyin veya parçanın diklik ayarlarının yapılabilmesi için bazı jig-transitlerde teleskobun yatay eksenine, ikinci bir teleskop veya yarı geçirgen (bazılarında bu eksene dik aynada bulunabiliyor) bir ayna takılmış olanları da mevcuttur.



Şekil 111. Jig-Transit [75]



Şekil 112. Elektronik teodolite [53]



Şekil 113. Total station [73]

Theodolite

Arazi ölçümlerinde, makine montajında ve hassas parçaların yerleştirilmesinde kullanılan, yatay ve dikey eksenlerde ölçüm yapma yeteneğine sahip cihazlardır (Şekil 112). Gerçekte bunlar yatay ve düşey eksenlerde açı ölçümü yapabilmesini sağlayacak sistemler ile donatılmış transitlerdir. Bu cihazlarla kot farkı ölçümleri de yapılabilir. Elektronik olanlarda mesafe ölçerler de (EDM) mevcuttur.

Total Station

Bunlar günümüzde kullanılan gelişmiş elektronik teodolitlerdir. Mesafe ölçer cihazları standart aksamlarıdır ve otomatik olarak çalışırlar. Bu cihazlar bir bilgisayar ile bir elektronik teodolitin bir araya getirilmiş halidir (Şekil 113).

Teodolitlerde olduğu gibi bu cihazlar da kullanım alanlarına göre çok çeşitlilik gösterirler. Işığın zamana göre yol kat etmesi prensibine göre veya faz kayması yardımı ile mesafe ölçümü yaparlar. Cihaz üzerinde hazır yazılımlar yerleştirildiği için ölçümleri, daha kısa sürede ve daha pratik yapabilme imkanı sağlamaktadırlar.

Kalibrasyon Metotları

Optik takımların kalibrasyonlarının yapılabilmesi için ortam şartları ile ilgili açıklamalar, mevcut standartlarda (ISO 17123-1, 17123-2) sıcaklık değerinin 2 dakikada 1 ^{o}C'yi geçmemelidir.

Bu sistemlerin kalibrasyon ve ayarları daha stabil ortamlar olan laboratuvarlarda yapılabildiği gibi açık arazi şartlarında da yapılabilir. Tavsiye edilen kontrollü ortamlar olan laboratuvarlarda yapılmalarıdır.

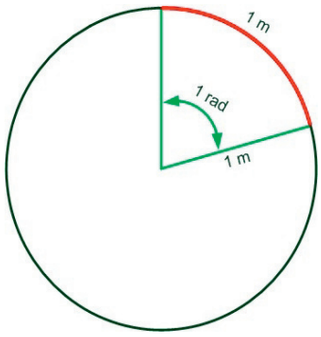
Bu sistemler için kalibrasyon standartları mevcut değildir. Mevcut standartlar üreticilerin cihazlarını karşılaştırmak ve hassasiyetlerini tespit etmek amacıyla hazırlanmış ISO 17123 serisi standartlarıdır. Bu standartlara göre yapılması gereken ölçümler, cihazların ölçüm ve ayarlarının laboratuvarda yapılmasından sonra, performans ve doğruluğunun teyidi ve tespiti için dışarıda (açık alanda) yapılır. Bu ölçümler farklı konum, açı ve yüksekliklere yerleştirilmiş hedefler (açı ve kolimasyon doğruluğu için) ile sıralı bir hat üzerine farklı mesafelere yerleştirilmiş hedefler (Mesafe ölçer testleri için kullanılan baz istasyonları) kullanılarak yapılmaktadır.

Laboratuvarda yapılan açı ve kolimasyon ölçümlerinin ve ayarlarının çoğunlukla üreticiler tarafından tasarlanmış özel kolimatör sistemleri ile yapılması tavsiye edilse de kolimatör sistemi kullanılmadan, sadece sistem içerisindeki cihazlar kullanılarak da yapılabilir. Kolimatör sistemlerinde kullanılan sistemler ise şöyle sıralanabilir; çok hedefli kolimatör, tek hedefli kolimatör, teleskop(lar) ve döner tabla. Laboratuvarda yapılan mesafe ölçerlerin kalibrasyonları için ise farklı boylarda da (30 m, 50 m vb.) benchler kullanılmaktadır.

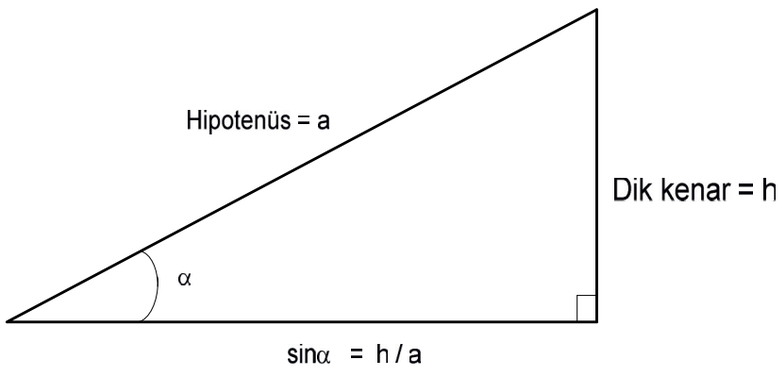
7.1.2 AÇI

7.1.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

SI'da tanımlı açı birimi "radyan", bir çemberde yarıçapa eşit yayın gördüğü açı olarak tanımlanır (Şekil 114) [76][77]. Radyan türetilmiş bir SI birimi olup, iki uzunluğun birbirine oranı bulunarak elde edilir. Bu işlem açı biriminin elde edilmesinde trigonometrik prensip kullanılarak gerçekleştirilir (Şekil 115). Bu yönteme ilave olarak, 2π radyan olan tam bir dairenin hassas bölünmesi ile de açı birimini elde etmek mümkündür [78][79][80][81][82].



Şekil 114. Radyanın tanımı



Şekil 115. Trigonometrik prensip ile uzunluk birimi "metre"den açı biriminin elde edilmesi

7.1.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Endüstride ve günlük yaşamımızda kullandığımız açı birimi ise derece (°) dir. Bir tam dairenin (2π radyan), 360 eşit parçaya bölünmesi ile derece birimi elde edilmektedir. Derece 60 eşit parçaya bölünerek açısal dakika (') (arc min) ve 3600 eşit parçaya bölünerek açısal saniye (") (arc sec) birimi elde edilmektedir. Açısal saniye ve açısal dakika kullanım sırasında pratik olması bakımından saniye ve dakika olarak kullanılır ancak bu birimler zaman birimi saniye ve dakika tanımından da anlaşılacağı üzere farklıdır [78][79][80][81][82].

360° = 2π rad

1° = (π /180) rad

1' = (1/60)° = (π /10 800) rad

1" = (1/60)' = (π /648 000) rad

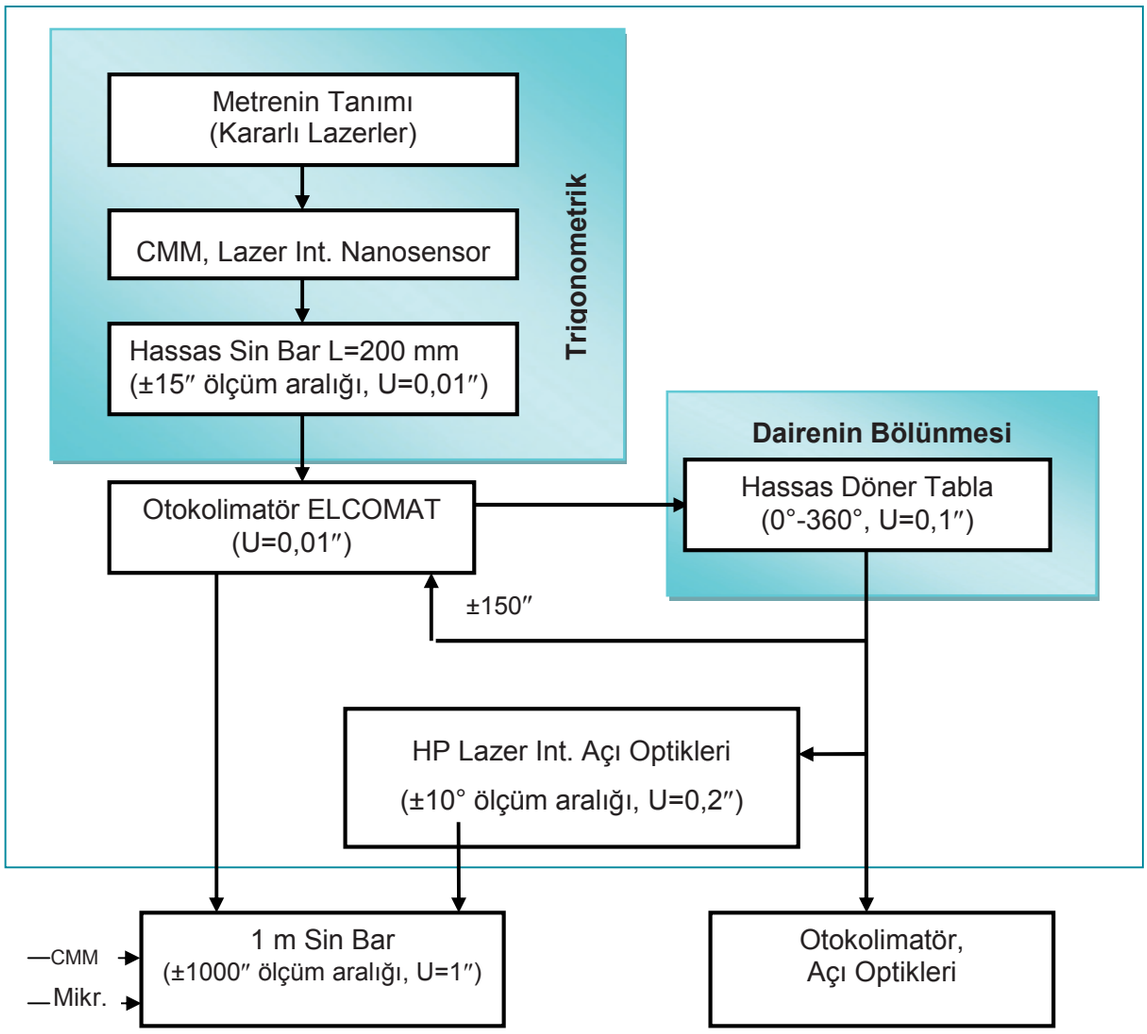
Bir tam dairenin 400 eşit parçaya bölünmesiyle “grade” birimi elde edilir. “Grade” ya da “gon” olarak adlandırılan açı birimi jeodezik çalışmalarda yaygın olarak kullanılır.

400 gon = 2π rad

1 gon = (π / 200) rad

Bir tam dairenin 6400 eşit parçaya bölünmesiyle elde edilen “milyem” birimi, askeri amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır (6400 milyem = 2π rad).

Açı ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri Şekil 116’da görülmektedir.



Şekil 116. Açı ölçümleri izlenebilirlik zinciri

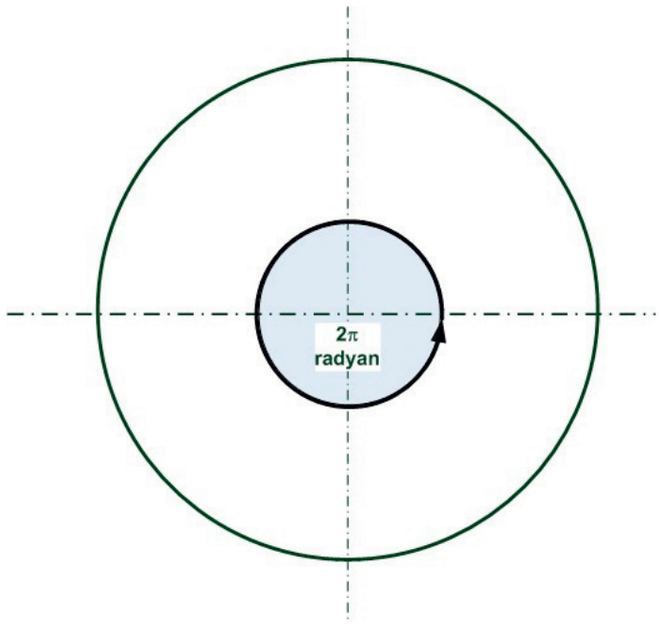
Açı Elde Etme Yöntemleri

Açı elde etmek için iki temel yöntem kullanılmaktadır [78][79][80][81][82]:

1. Dairenin Bölünmesi (temel metot)
2. Trigonometrik prensiplere dayalı metot

1. Dairenin Bölünmesi:

Bu yöntemde dairenin bir bütün olduğu ve bölünmesi durumunda oluşan hataların yine dairenin bütünlüğünü bozamayacağı, tüm hataların toplamının yine sıfır olacağı prensibi kullanılmaktadır (Şekil 117). Bir daire 5 eşit parçaya bölündüğünde oluşan açı dilimleri nominal değer olarak 72º olsa da gerçekte 72 ± δ şeklinde bir δ hatasına sahip olacaktır. Beş dilimin hataları toplamı, sonuçta bir daireyi oluşturuyor olduğundan, sıfır olacağı prensibi ile her bir açı diliminin hatası bulunur. Dairenin bölünmesi prensibi kullanılarak açı standartlarının kalibrasyonları yapılır [77].

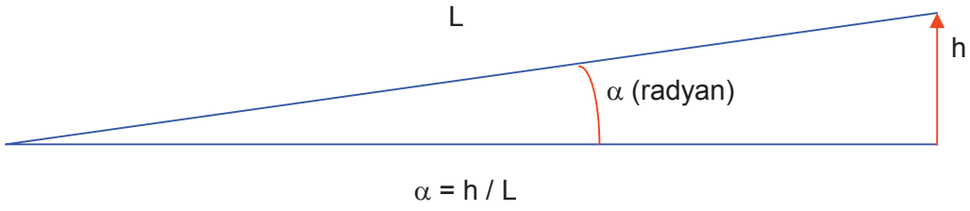


Şekil 117. Dairenin bölünmesi ile açı biriminin elde edilmesi: Temel referans 2π radyan, tam daire

Örneğin poligon, indeks tabla, açı mastar blokları gibi açı standartlarının kalibrasyonlarında temelde bu prensip kullanılır, hesaplama teknikleri farklılık gösterse de temel prensip aynıdır, değişmez.

2. Trigonometrik Prensiplere Dayalı Metot:

Bir dik üçgende, trigonometrik fonksiyonlar kullanarak, dik kenar boyu ve hipotenüs boyu bilindiğinde oluşan açı hesaplanabilir (Şekil 118). Hipotenüs boyu sabit olmak üzere dik kenar boyunun değişmesiyle çeşitli açılar elde edilebilir. Veya çok küçük açılarda, iki kenarın birbirine oranı ile açı birimi elde edilebilir. Bu dik üçgendeki hipotenüs ve dik kenar boyu izlenebilirliklerini metre biriminden almaktadır.



Şekil 118. Uzunluk biriminden açı birimi radyanın elde edilmesi

Referans Açı Standartları

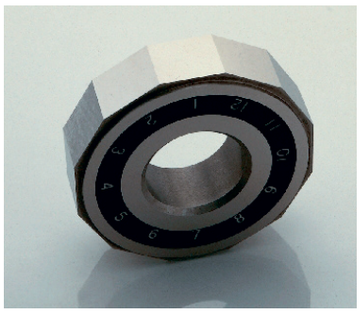
Açı mastar blokları, poligonlar, indeks tabla ve enkoderlerin kullanıldığı hassas döner tablalar referans açı standartlarıdır [78][79][80][81][82].

Açı Mastar Blokları:

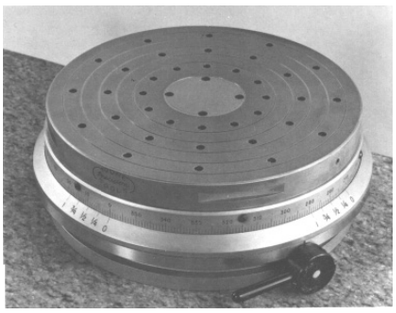
Krom karbür (karbit) (croblox) ya da özel sertleştirilmiş çelikten imal edilen ve optik kalitede yansıtıcı bir yüzeye sahip olan açı mastarları, iki komşu yüzey arasında açı değerini muhafaza etmektedir. Yüzey kalitesi açı mastarlarının birbirlerine yapıştırılarak farklı açılar elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Şekil 119).



Şekil 119. Açı mastar blokları



Şekil 120. 12 yüzlü çelik poligon



Şekil 121. 1440 İndeks TABLA

Poligonlar:

Sertleştirilmiş çelik, zerodur ya da özel optik camdan imal edilmektedir (Şekil 120). Poligon yüzeyleri optik kalitede olup yansıtıcı özeliğe sahiptir. En fazla 72 yüzeyi ve en az 4 yüzeyi bulunan poligonlar mevcuttur. 4 yüzeyli poligonlar “true square (hassas kare)” olarak anılır. Poligonlar, otokolimatör ile birlikte indeks tabla ve döner tabla kalibrasyonlarında kullanılmaktadır [76].

İndeks Tabla:

0° - 360° arasında hassas açılara sahip çok kullanışlı bir referans standarttır (Şekil 121). İndeks tablanın en küçük açı aralığı, çevredeki çentiklerin ya da kürelerin sayısı ile değişir. İndeks tabla, poligonların ve açı mastar bloklarının kalibrasyonlarında, otokolimatör ile birlikte kullanılır [76].

Hassas Döner Tabla:

Dairenin, enkoder (0,001" çözünürlükte) bağlanmış, hava yastıklı döner tabla kullanarak, hassas bir şekilde bölünmesi ile elde edilir. Yüksek doğruluklu, çok küçük adımda açısal büyüklükler tablaya ait nano konumlama (pozisyonlama) mekanizmaları ile elde edilebilmektedir.

Küçük Açı Üreteci

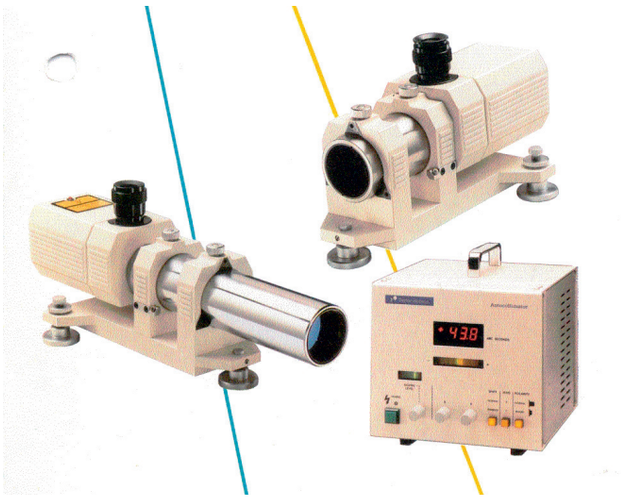
Küçük açı üreteci, trigonometrik prensiplere dayalı metot kullanılarak referans açıları üreten cihazdır. Bu metodun kullanıldığı, farklı amaçlara uygun olarak, çeşitli doğruluk ve hassasiyetlerde açı üreteçleri bulunur.

Küçük Açı Ölçen Cihazlar

Referans açı ölçüm cihazları olarak, otokolimatör ve lazer açı optikleri kullanılmaktadır.

Otokolimatör:

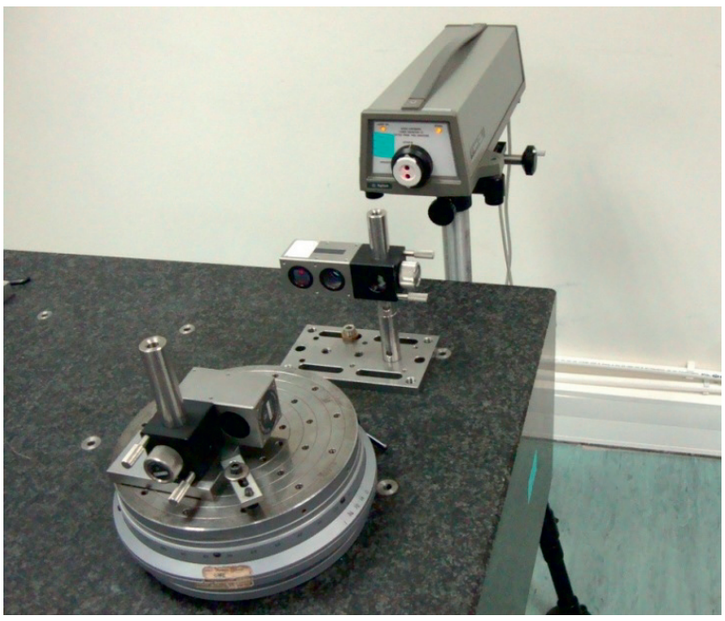
Otokolimatör, küçük açısal yer değişimleri ölçen optik bir cihazdır (Şekil 122). “Collimate” kelimesi latince “collimare”den gelip aynı hizada toplamak anlamına gelir. Dikey ve yatay eksende “arc saniye” olarak açı okuması verebilen cihazlar poligon, indeks tabla ve açı mastarları gibi açı standartlarının kalibrasyonlarında kullanılır [76].



Şekil 122. Otokolimatör

Lazer Açı Optikleri:

Açı optikleri (Şekil 123); açı interferometresi ve açı yansıtıcısı arasında iki paralel ışın demeti oluşturur. Açı yansıtıcısı birbirine monteli iki küp korner yansıtıcıdan, açı interferometresi ise birbirine monteli iki ışın bölücüden oluşur. Burada açı ölçümünde sinüs prensibi (trigonometrik prensibe dayalı metot) kullanılmaktadır. Açı ölçümünün çözünürlüğü, 0,01 açısal saniye (arc sec) ve ölçme aralığı ±10 derece’dir.



Şekil 123. Lazer interferometre açı optikleri

Açı Ölçen Laboratuvar Ekipmanları ve Cihazları

Endüstride açı ölçümlerinde döner tabla, seviye ölçer, su terazisi, klinometre ve açı ölçer gibi ekipmanlar kullanılır [76][78][79][80][81][82].

Döner Tabla:

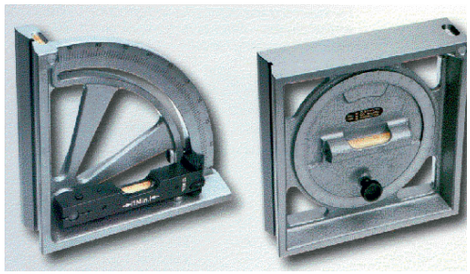
Dairenin bölüntülenmesiyle açıyı oluşturan ve ölçen bu ekipmanlar genellikle freze ve hassas delik delme tezgahlarında parça imalatı esnasında kullanılırlar (Şekil 124). Bazı döner tablalar divizörler gibi sonsuz vida ve karşılık dişlisi ile çalışır. Karşılık dişlisine bağlı olan tablanın çevresinde 1°'lik 360 bölüntü bulunur. Sonsuz vidayı çeviren kol üzerindeki tambur, dakika ve saniyeleri gösterecek şekilde bölüntülenmiştir.



Şekil 124. Döner tabla



Şekil 125. Seviye ölçer



Şekil 126. Klinometre

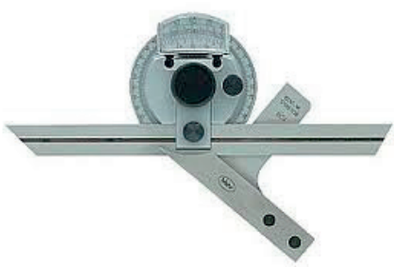
Seviye Ölçer:

Referans yüzeylerin düzlemsellik kalibrasyonunda kullanılır (Şekil 125). Yatay düzlemdeki açı değişiklikleri duyarlı başlıklar yardımı elektrik sinyale dönüşür ve açı okuması yapılır. En önemli kullanım alanlarından birisi referans masaların kalibrasyonudur.

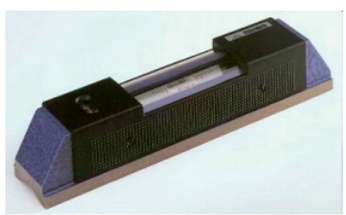
Klinometre:

Her konumdaki eğim açılarının kontrolünde ve ölçülmesinde kullanılan klinometreler değişik tip ve kapasitede imal edilmişlerdir (Şekil 126). Cihazın esas kullanım amacı iş parçasının iki kenarının açısının ölçümüdür. Klinometrenin açı ölçüm skalası yardımıyla büyük açılar ölçülür. Klinometre, büyük açı ölçer ve küçük açı ölçerin birleşimidir.

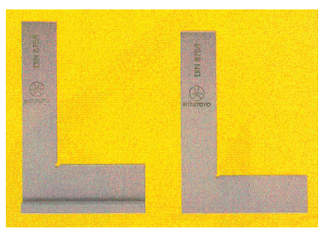
Bunların dışındaki diğer açı ölçüm cihazları ise Şekil 127'de görülmektedir.



Açı ölçer



Su terazisi



Gönye

Şekil 127. Açı ölçer, su terazisi ve gönye çok yaygın genel kullanıma sahip açı ekipmanlarıdır

7.2. ZAMAN VE FREKANS ÖLÇÜMLERİ

7.2.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Yedi temel SI biriminden olan zaman birimi Saniye günümüzde 10^{-15} - 10^{-16} belirsizlikle, en doğru ölçülebilen ve üretilebilen birimdir. Gelişen teknolojiyle birlikte doğru zaman bilgisine olan ihtiyacı karşılamak, havacılık, navigasyon, uzay ve savunma sistemlerinde özel önem taşıyan zaman oluşum sistemlerini iyileştirmek için teknolojisi gelişmiş ülkeler zaman ve frekans ölçüm standartları sistemlerini kurarak, geliştirilmesi için yapılan çalışmaları desteklemektedir. Ayrıca SI birimi Saniyenin bu denli düşük belirsizlikle elde edilmesi, diğer SI birimlerinin oluşturulmasında ve ölçüm doğruluklarının artırılmasında önemli rol oynar.

Zaman ve frekans sistemlerini anlamak için, saniyenin günümüze kadar süregelmiş tarihsel gelişimini ve izlenebilirliğinin nasıl elde edildiğini bilmek çok önemlidir.

Zaman Birimi Saniyenin Tarihsel Tanımları

1960 Yılından Önce

Evrensel zaman, dünyanın kendi etrafında dönüş süresini temel alan bir zaman ölçeğidir. Ortalama bir güneş günü 86400 s'dir. Evrensel Zaman (UT)'nin kutuplara göre bazı düzeltmeler yapılmış hali UT1 olarak tanımlanır. Dünyanın denizlerle kaplı olması, Ay'ın ve diğer gezegenlerin dünya üzerindeki çekim etkisi, oluşan gel-git olayları, depremler gibi doğal olaylar, dünyanın kendi etrafında düzenli dönmesini engeller. Bu da dünyanın kendi etrafında dönüş süresinde ~3×10^{-8} (2-3) ms belirsizliğe sebep olur. 1960 yılına kadar kullanılan Evrensel Zaman Ölçeği, 11. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (11. CGPM) yerini ET zaman ölçeğine bırakmıştır.



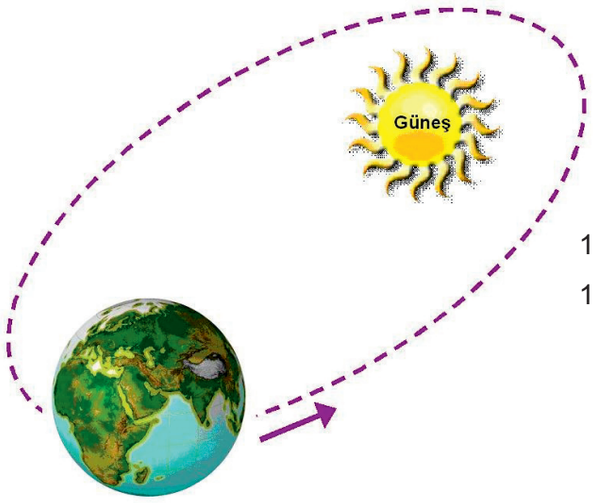
1 gün = 86400 saniye

1 saniye = 1 / 86400 gün

Şekil 128. Evrensel zaman ölçeği (Universal Time Scale, UT1)

1960-1967 Yılları Arasında

1 saniye 1900 yılında yerkürenin güneş etrafında bir tur dönme süresinin 1/31556925,9747 kadarı olarak tanımlanır. Bu zaman ölçeğine "Ephemeris Time" (ET) denir. ET ve UT1 (Universal Time) zaman farkı sabit değildir, değişebilir. Astronomik yöntemlerle oluşturulan bu saniyenin belirsizliği ~2×10^{-9} seviyesindedir ve bu ölçek 11. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (11. CGPM) kabul edilmiştir.



1 yıl = 31556925,9747 saniye

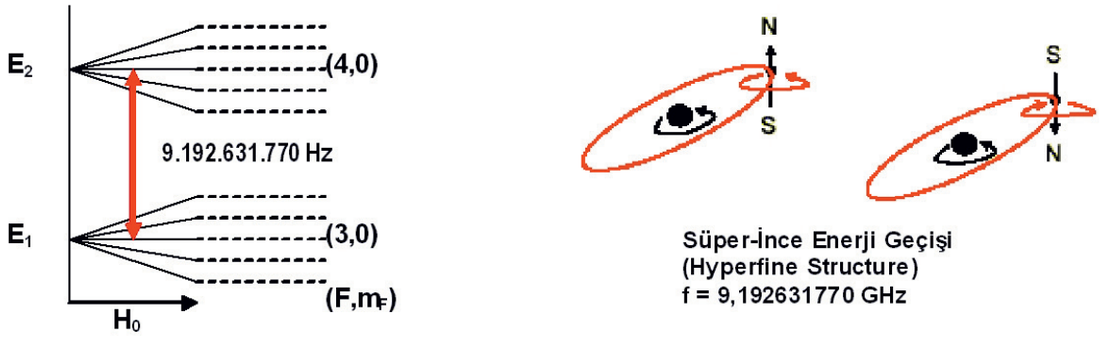
1 saniye = 1 / 31556925,9747 yıl

Şekil 129. Ephemeris zaman ölçeği (ET).

1967 Yılından Sonra

1967'de 13.sü düzenlenen Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda zaman birimi saniyenin tanımı şu şekilde yapılmıştır;

"1 Saniye, temel durumda bulunan Sezyum 133 (^{133}Cs) atomunun, iki aşırı-ince düzeyi arasındaki enerji geçişine denk gelen elektromanyetik ışımanın periyodunun süresinin 9192631770 katına karşılık gelen süredir."



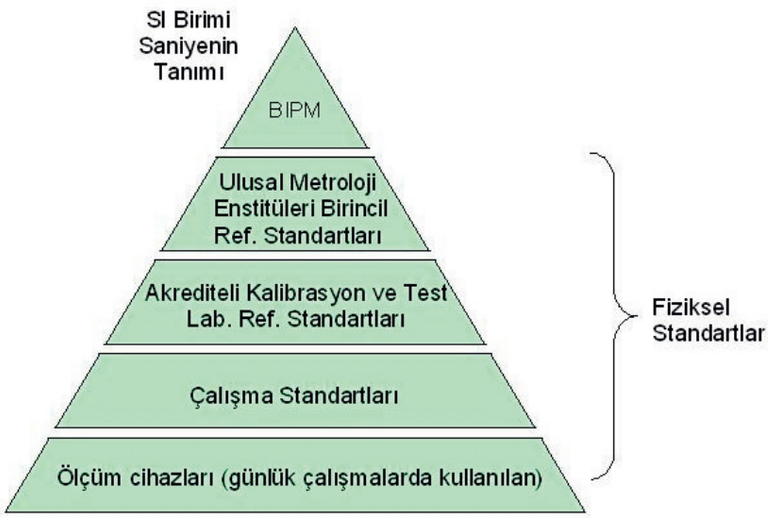
Şekil 130. ^{133}Cs Atomunun aşırı-ince yapısı (Hyperfine Structure).

Zaman Ölçeğinin Uluslararası İzlenebilirliği ve Oluşturulması

Yapılan herhangi bir ölçüm sonucu, daimi bir karşılaştırma zinciri ile uluslararası tanım veya standartlara bağlı ise bu ölçüm, izlenebilirliğe sahiptir denir. Şekil 131'de zaman ve frekans sisteminin izlenebilirliğini gösteren izlenebilirlik piramidi gösterilmiştir.

İzlenebilirlik piramidinde, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM), geçerli olan zaman birimi saniyenin tanımını gerçekleştirmek için, bir altındaki ulusal metroloji enstitüleri ile koordinasyonu sağlar. Ulusal metroloji enstitüleri, akredite kalibrasyon laboratuvarlarının referans standartlarını kalibre ederek, ülkedeki zaman ve frekansla ilgili ölçümlerin izlenebilir olmasını ve güvence altına alınmasını sağlar. Günlük çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazları veya çalışma standartları, izlenebilirliğin sağlanması için bir üst seviye olan akredite kalibrasyon

laboratuvarlarınca veya ulusal metroloji enstitüleri tarafından kalibre edilir. Böylece günlük yaşantımızda yaptığımız en alt seviyede ölçümlerin, en üst seviye olan, SI Biriminin tanımlandığı yere, BIPM'e kadar izlenebilir olması sağlanır.

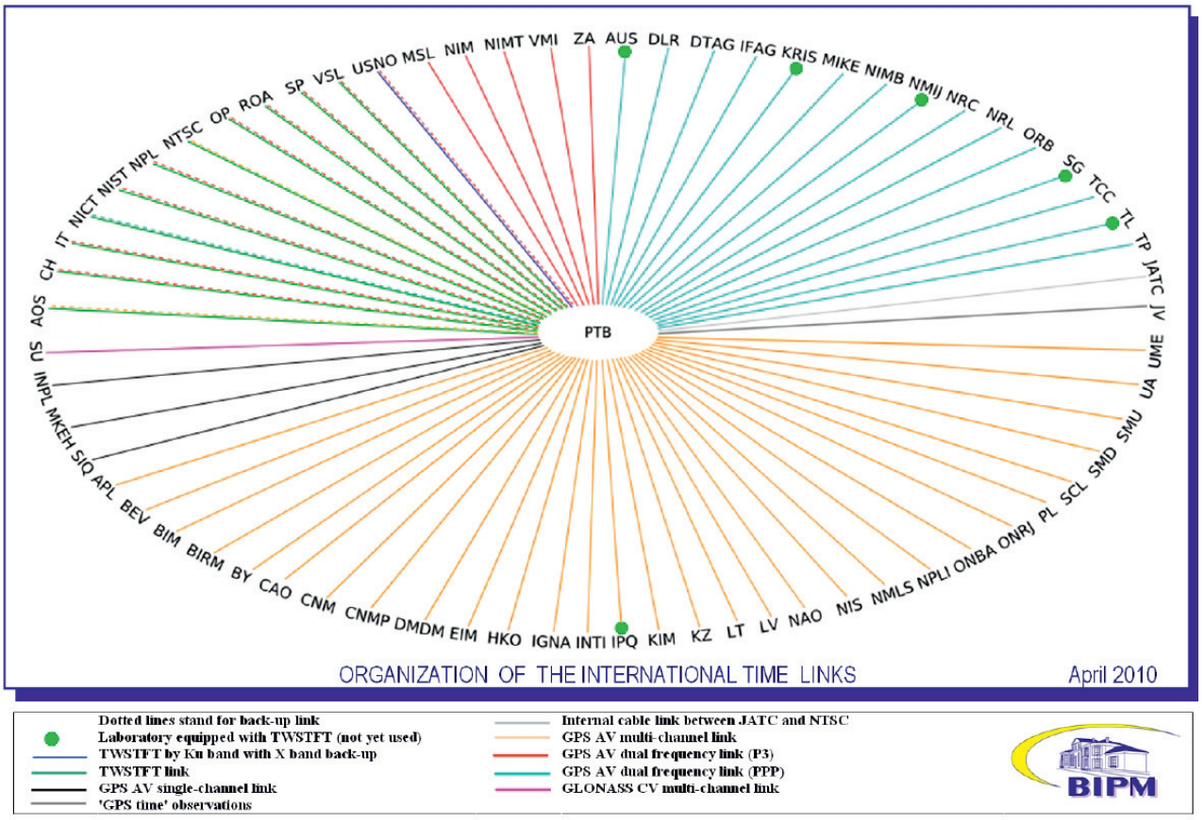


Şekil 131. Zaman frekans sistemi izlenebilirlik piramidi

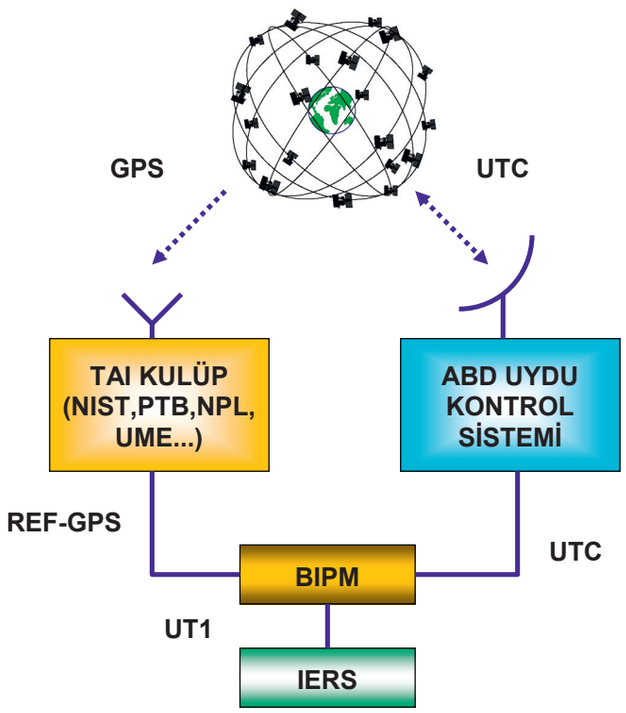
BIPM ve ulusal metroloji enstitüleri, koordineli bir şekilde işbirliği yaparak SI Birimi saniye'yi ve buna bağlı olan zaman ölçekleri Uluslararası Atomik Zaman (TAI, International Atomic Time) ve Koordineli Evrensel Zamanı (UTC, Coordinated Universal Time) oluştururlar. Frekans (Hz) ise türetilmiş bir SI birimi olarak saniyeden türetilir.

Günümüzde Koordine Evrensel Zaman adı altında oluşturulan zaman ölçeği genel olarak Evrensel Zaman (UT1, Universal Time) ve TAI ölçeklerinin birleştirilmesi ile gerçekleştirilir. UT1 yerkürenin kendi etrafında dönüş süresine bağlıdır ve dünya rasathanelerinin katkılarıyla Uluslararası Yerküre Dönüş Servisi (IERS, International Earth Rotation and Reference Systems Service) tarafından oluşturulur. TAI ise atomik saatleri esas alır ve BIPM tarafından TAI Kulübü'ne üye metroloji merkezlerinin referans saatlerinin katkılarıyla oluşturulur. TÜBİTAK UME'de de mevcut beş adet Cs atomik saati ile iki adet Küresel Yer Belirleme Sistemi (GPS, Global Positioning System) uydu alıcısıyla Eylül 1994 tarihinden itibaren TAI kulübü üyesidir ve UTC zaman ölçeğinin oluşturulmasına katkıda bulunmakta ve uluslararası izlenebilirliğini sağlamaktadır. Şekil 132'de UTC oluşumuna katkı sağlayan uluslararası metroloji laboratuvarların zaman dağıtım ve karşılaştırma bağlantıları verilmiştir [83].

Yerküre etrafında zaman ve konum belirlemek amacıyla altı farklı yörüngede toplam 24 adet GPS uydusu dolaşır. Bu uydularda bulunan atomik saatler ABD'de bulunan özel istasyon USNO'dan gönderilen zaman sinyalleri ile eşzamanlı olarak çalışarak sürekli yerküreye zaman sinyalleri gönderir (Şekil 133). UME ve diğer TAI kulübü üyesi zaman ve frekans laboratuvarı ise uydu zaman alıcısıyla elde ettikleri bu zaman sinyallerini kullanarak uydulardaki saatlerle referans saatler arasındaki zaman farkını sürekli ölçer. Sonuçlar internet aracılığı ile her hafta BIPM'e gönderilerek TAI kulübü üyelerinin referans saatleri ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda, saatlerin doğruluk ve kararlılıklarına göre hangi ağırlıklı ortalamayla TAI'nin oluşmasına katkıda bulunduğu belirtilir. Ayrıca her saatin oluşan UTC zamanından olan farkı da hesaplanır. Hesaplanan bu değerler Circular T XXX şeklinde BIPM tarafından aylık olarak yayınlanır. Böylece TAI kulübü üyelerinin referans saatlerinin izlenebilirliği elde edilmiş olur.



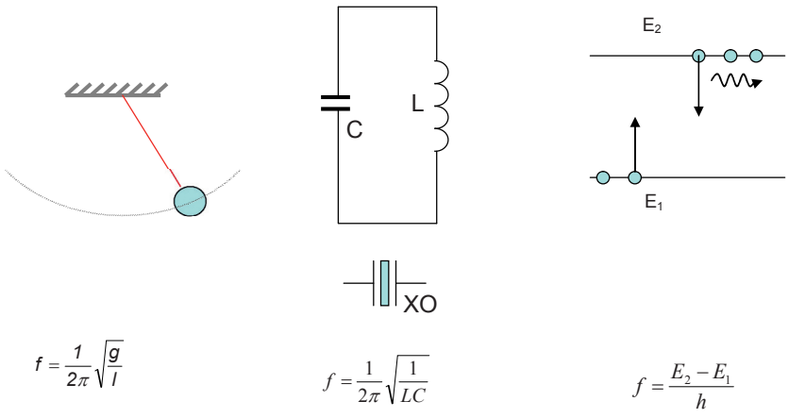
Şekil 132. Uluslararası zaman bağlantı organizasyonu



Şekil 133. Koordineli Evrensel Zaman UTC'nın gerçekleştirilmesi ve izlenebilirliğin sağlanması

7.2.1.2 Ölçüm Standartları

Bir zaman ve frekans standardının kalbi, onun frekansını belirleyen rezonatörüdür. Şekil 134'de zaman ve frekans standartlarının tarihsel gelişimini de sergileyen, temel fiziksel olaylar ve bunların rezonans frekansları verilmiştir. Frekans standartlarını kullanılan rezonatör tipine göre sınıflandırabiliriz: Mekanik rezonatörler, elektroniksel rezonatörler ve optik (atomik geçiş) rezonatörleri.



Şekil 134. Frekans standartları rezonatörleri

Günümüzde zaman ve frekans işaretlerini en yüksek doğrulukta ve kararlılıkta üreten cihazlar atomik frekans standartları veya başka bir deyişle atomik saatlerdir. Atomik saatler, atom veya moleküllere ait kuantlanmış enerji seviyelerini rezonator olarak kullanan yüksek doğruluğa ve kararlılığa sahip osilatörlerdir. Bu özellikleriyle günümüzün ileri teknolojisi ile gerçekleştirilen atomik saatler 3 milyar yılda sadece 1 s sapabilmektedir (belirsizlik :~1×10^{-17}).

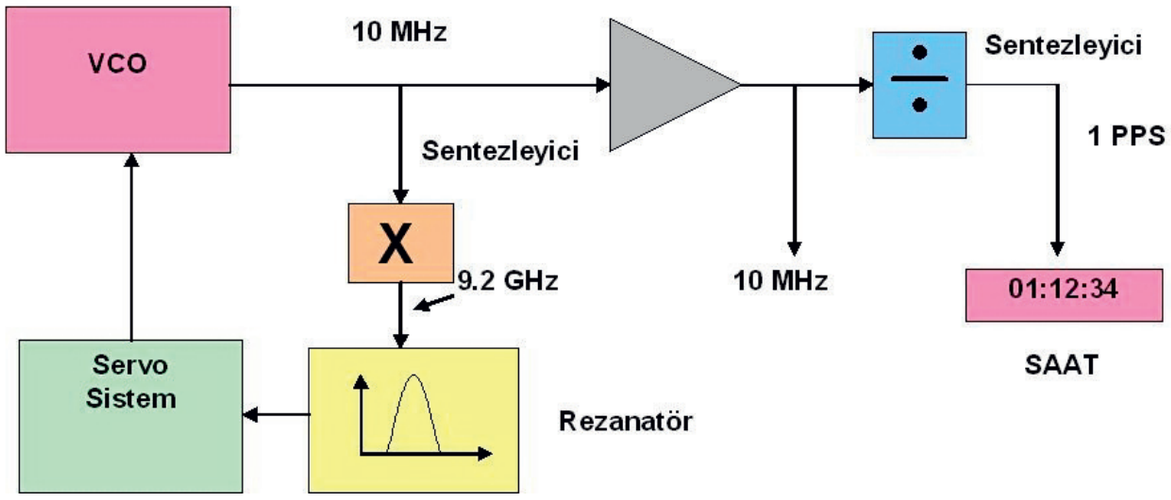
1952 yılında NBS'de gerçekleştirilen ve "evrenin en doğru zaman makinesi" olarak karikatürize edilen ilk sezyum tabanlı atomik saati, günümüzde ticari olarak üretilen ve boyutları 3 cm'yi geçmeyen yonga-ölçekli atomik osilatörler (Şekil 135) ile yaklaşık aynı belirsizliğe sahiptir (~1×10^{-10} , 300 yılda 1 s sapmakta).



Şekil 135. a) İlk gerçekleştirilen atomik saat, b) Yonga ölçekli atomik osilatör

Birincil zaman ve frekans standartları (primary time & frequency standards), uluslararası kabul edilen saniyenin tanımını fiziksel olarak kendi içinde gerçekleştiren yüksek teknolojiye sahip standartlardır. İkinci seviye frekans standartları ise birincil seviye frekans standartlarına herhangi bir yolla izlenebilirliği sağlanmış ölçüm cihazlarıdır.

Şekil 136'da bir Cs tabanlı atomik frekans standardının veya atomik saatin blok yapısı verilmiştir.



Şekil 136. Atomik frekans standardı

Atomik frekans standartları doğrudan kendi rezonatör çıkışlarını kullanarak frekans üretmezler. Bunun yerine kullanılan gerilim kontrollü osilatörün (VCO) çıkışını kullanır. Şekil 136'da görüldüğü gibi atomik rezonatör çıkış frekansını, kilitleme işleminde kullanılır. Kuvartz tipi frekans standartları ise kendi iç rezonatörüne sahiptir ve sıcaklık nem gibi çevresel parametrelere aşırı bağımlıdır. Şekil 136'da atomik frekans standardını, kendini atomik rezonatör frekansına göre otomatik olarak kalibre eden bir kuvartz frekans standardı olarak düşünebiliriz. Çünkü kuvartzın, yapısı itibari ile zamanla yaşlanmaya uğrayacağı, sıcaklık değişimlerinden etkileneceği kaçınılmaz bir olaydır. Bu etkiler, servo sistem ve atomik rezonatör tarafından bertaraf edilecektir.

VCO'nun nominal çıkış frekansı sentezlenerek daha yüksek atomik rezonatör frekansına çıkartılır. Rezonatör çıkışındaki işaret, servo sisteme iletilerek VCO'nun çıkış frekansını küçük çapta taranması sağlanır. Bu işlem rezonatör frekansının aranmasına ve bu frekansta sistemin kilitlenmesine neden olacaktır. İstenen frekansa kilitlenme sağlanırsa, servo sistem bu atomik saatin bu frekansta çalışmasını sağlayacaktır. Böylece çıkış frekansı 10 MHz ve 1PPS işaretleri de atomik geçişli rezonatöre izlenebilir olacaktır [84].

Zaman ve Frekans Dağıtım Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Genel olarak zaman ve frekans bilgisi dağıtan sistemler, alıcı ve verici arasındaki ortamın karakteristiğine (zaman olarak alıcı-verici mesafesi ve bu mesafenin değişimi) bağlı olarak üç kategoride sınıflandırılır [85]. Tablo 14'de verilen dağıtım yöntemleri de bu üç kategoriden biri ile ilişkilendirilebilir.

1) Tek Yönlü Dağıtım (One Way): Alıcı ile verici arasındaki yolun zaman olarak uzunluğu ve bu uzunluğundaki belirsizliği bazı yardımcı veriler kullanılarak hesaplanır. GPS sisteminden doğrudan zaman alma bu kategoridedir. GPS navigasyon mesajı içindeki yardımcı veriler kullanarak yolun uzunluğu belirlenebilir. LORAN-C ve DCF77 gibi yayın yapan Radio Saatleri de bu kategoridedir.



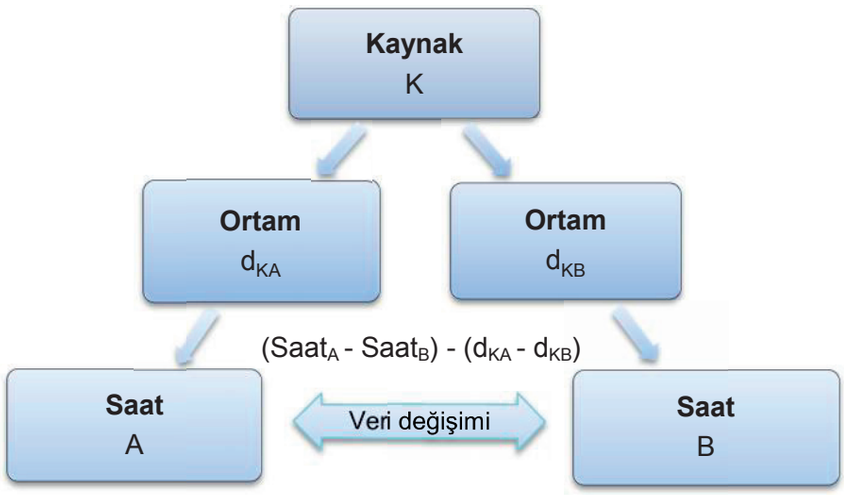
Şekil 137. Tek Yönlü zaman dağıtımı

2) Çift Yönlü Dağıtım (Two Way): Alıcı ve verici arasındaki yolun uzunluğu sistem tarafından ölçülür. Böyle sistemler yolun uzunluğunu karakterize eden yazılımsal ve donanımsal araçlar içerir. Telefon Hattı, NTP (Network Time Protocol) [86] ve TWTFT bu kategoridedirler. Telefon hattında hattın gecikmesini ve standart sapmasını belirlemek için alıcı ve verici arasında bir protokolle bir karakter gönderilir ve alınır. NTP sisteminde de yolun gecikmesini belirlemek için istemci zamanını ve sunucu zamanını içeren NTP paketinin taşıdığı bölümler vardır. TWTFT'de ise alıcı ve verici kendi zaman bilgilerini belirli aralıklarla belirli bir formatta birbirlerine gönderirler. Karşılaştırma işlemi bittikten sonra her iki tarafın ölçüm bilgileri birbirinden çıkartılarak alıcı ve verici arasındaki mesafe belirlenir.



Şekil 138. Çift Yönlü zaman dağıtımı

3) Ortak Görüş Yöntemi (Common Way): Bu metotta en az iki adet olmak üzere zaman alıcıları ortak bir kaynaktan zaman bilgisi alır. Eğer kaynak ile alıcılar arasındaki tek yönlü mesafe eşitse, alıcılar kendi aralarındaki zaman farklarını belirleyebilirler. Bu yöntemle kaynak tarafından ve mesafeden kaynaklanan hataların çoğu giderilebilir. Daha sonra ayrıntıları verilecek olan GPS Ortak Görüş Yönteminde de GPS uydusunun saat ve yörünge hatası, iyonosferi ve trofosferik gecikme hataları her iki alıcı içinde ortaktır. Alıcılar ölçtükleri zaman bilgilerinin farkını alarak bu ortak bileşenlerin çoğunu yok eder veya etkisi azaltır [87].



Şekil 139. Ortak görüş yöntemi

Zaman ve Frekans Dağıtım Yöntemleri

Zaman ve frekans dağıtımının temelde 2 amacı vardır. 1) İkincil seviyedeki bir zaman ve frekans standardının birincil seviye standartlara olan izlenebilirliğinin sağlanması. 2) İki zaman ve frekans standardı arasında ki eşzamanlılığın sağlanması.

Günümüzde en yüksek kararlılığa sahip frekans üreten osilatörler atomik frekans standartlarıdır. Bir frekans standardı ne kadar yüksek doğruluğa ve kararlılığa sahip olursa olsun temel uluslararası SI birimine izlenebilir referans bir frekans standardına izlenebilir olması gerekir. Bunun için de birincil seviye bir referans frekans standardı ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu karşılaştırma işlemi aslında frekans standardının kalibrasyonun yapılması veya birincil referans frekans standardının zaman ve frekans bilgisinin diğer frekans standardına aktarılması veya birincil seviye bir referans frekans standardına izlenebilir olması demektir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, kendi zaman ve frekans ölçüm ihtiyaçlarını karşılamak için ulusal metroloji enstitüleri yüksek doğruluğa ve kararlılığa sahip atomik frekans standartları bulundurarak sürekli izlenebilirliklerini sağlarlar. Laboratuvarlarında elde ettikleri yüksek kaliteli izlenebilir zaman ve frekans bilgisini de ülke çapında, uluslararası kabul görmüş veya kendi geliştirdikleri zaman ve frekans dağıtım yöntemleri ile dağıtmaktadırlar. Tablo 14'de uluslararası düzeyde kabul görmüş bazı zaman ve frekans dağıtım yöntemleri ve araçları gösterilmiştir.

Tablo 14. Zaman ve frekans dağıtım yöntemleri

Yöntem	Gerekli Araçlar	Zaman Belirsizliği (24 saat)	Frekans Belirsizliği (24 saat)
Telefon hattı ile dağıtım	Bilgisayar, istemci yazılımı, modem, telefon hattı	< 15 ms	Frekans ölçümü için önerilmez.
Internet Zaman Sunucu (Network Time TServer - NTP)	Bilgisayar, iştemci yazılımı, internet bağlantısı	< 10 ms, WAN için < 1 ms, LAN için	Frekans ölçümü için önerilmez.
HF Radyo Yayını (3-30 MHz)	HF alıcı ve anteni	(1 – 20) ms	10^{-6} – 10^{-9}
LF Radyo Yayını (30 kHz -300 kHz)	LF alıcı ve anteni	< 1 µs	10^{-10} – 10^{-12}
GPS (Tek Yönde, Doğrudan)	GPS alıcı ve anteni	< 20 ns	2×10^{-13}
GPS (Tek kanal-Ortak Görüş)	Referans, GPS alıcı ve anteni	< 10 ns	$< 1\times10^{-13}$
GPS (Çok kanal-Ortak Görüş)	Referans, GPS alıcı ve anteni	< 5 ns	$< 5\times10^{-14}$
GPS (Tüm Görüş) (All in View)	Referans, GPS alıcı ve anteni	< 3 ns	$< 3\times10^{-14}$
GPS (Geodetic) Çift frekanslı, faz ölçümü	Referans, Jeodetik GPS alıcı ve anteni	< 500 ps	$< 5\times10^{-15}$
Geostationary Uydu (Tek yönde)	Referans, Uydu, alıcı, anten ve modem	< 10 µs	$< 10^{-11}$
Geostationary Uydu (Her iki yönde) (TWSTFT)	Referans, Uydu, alıcı, verici, antenler ve modem	< 1 ns	$< 10^{-14}$

Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Atomik zaman ve frekans standartları her ne kadar atomik geçişlere izlenebilir olsa bile sistemin yapısından, oda sıcaklığındaki atomların Doppler etkisinden, yerin manyetik ve çekim alanlarından kaynaklanan bazı etkilerden dolayı belirli bir hassasiyetin üzerinde kalibrasyona ihtiyaç duyabilir. Gerek atomik gerek atomik olmayan zaman ve frekans standartlarının, kendilerinden daha doğru, kararlı bir izlenebilir referans zaman ve frekans standardı ile karşılaştırılma yoluna gidilerek kendi izlenebilirlikleri sağlanabilir.

Frekans birimi her ne kadar zaman biriminden türetiliyormuş gibi görünse de bu iki birim birbirlerinden türetilir, başka değişle bu iki birimi üreten sistemler karşılıklı (reciprocal) sistemlerdir. Her iki birim arasında geçiş aşağıdaki ifade ile yapılabilir:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta t}{T} \qquad (17)$$

Burada f nominal frekans çıkışı, Δf frekans değişimi, Δt zaman değişimi, T ölçüm süresidir.

Zaman ve frekans karşılaştırılmalarını, standartların bulundukları yere bağlı olarak iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Bunlarında birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır.

1) Yerel karşılaştırma: Referans frekans standardı ve karşılaştırılacak olan diğer frekans standardı aynı yerde bir frekans sayıcısı kullanarak karşılaştırılır. Karşılaştırma / kalibrasyon sonrası ve öncesi frekans standardının çalışır şekilde nakledilmesi gerekir. Karşılaştırma / kalibrasyon sonrası frekans standardındaki kaymaların tahmin edilmesi zorlaşır. Kalibrasyon sonrası farklı ortamda bulunması bir diğer dezavantajdır. Kalibrasyon işlemi uzun süre aldığından kullanıcı bu sürede kendi frekans standardını kullanamaz.

2) Uzaktan karşılaştırma: Referans frekans standardı ve karşılaştırılacak olan diğer frekans standardı birbirinden uzak farklı yerlerde bulunabilir. Tablo 14'de belirtilen uygun olan sistemlerden biri ile karşılaştırma yapılabilir. Karşılaştırılan cihaz sürekli bulunduğu ortamda kaldığı için ısıl dengesi bozulmaz. Frekans kayması kolay hesaplanır. Karşılaştırma esnasında kullanıcı, frekans standardını diğer işlerinde kesintiye uğramadan kullanabilir. Ancak ölçüm sisteminin gürültüsü frekans standardının kısa dönem kararlılığından büyük olduğu için frekans standardının kısa dönem kararlılıkları ölçülemez. Ölçme zamanı yerel karşılaştırmaya göre daha fazla zaman alabilir.

Frekans Ölçüm Yöntemleri – Yerel Karşılaştırma

Zaman ve frekans standartlarının ölçümlerinde genelde iki parametrenin ölçümü yapılır. Frekans standardının çıkış doğruluğu ve frekans kararlılığı. Bu iki parametre genellikle ölçülen ya da toplanan aynı veriler üzerinden hesaplanır.

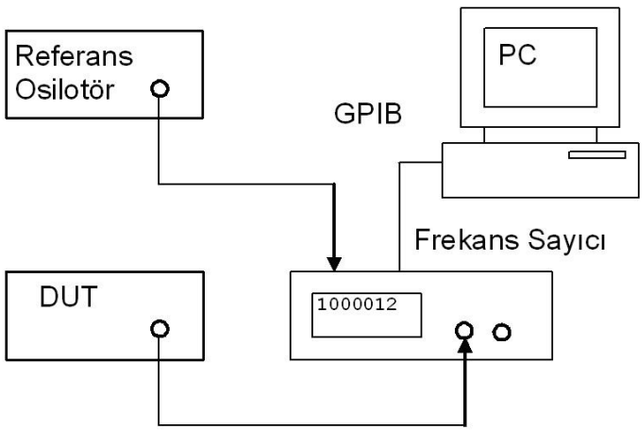
Frekans ölçümü için 2 tip ölçüm yöntemi kullanılır:

1. Doğrudan frekans ölçüm yöntemi (frekansmetre kullanarak),
2. Faz ölçüm yöntemi (zaman aralığı ölçümü kullanarak).

Bu iki ölçüm birbirlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Doğrudan frekans ölçümü ile faz ölçümü arasındaki temel fark, ölçüm çözünürlüğüdür. Kalibrasyona gelen frekans standardının kararlılık parametreleri sayıcının frekans ölçüm çözünürlüğünden küçükse birinci yöntem, yakın veya büyükse ikinci yöntem tercih edilir. Çünkü ikinci yöntem (faz ölçüm yöntemi) ölçüm süresi ile ölçüm çözünürlüğü arasında doğrusal bir orantı sağlar. Yani ölçüm süresi ne kadar artırılırsa çözünürlük de o derece artar. Doğrudan frekans ölçümünde ise kullanılan frekans metrenin dijit çözünürlüğü ölçüm çözünürlüğünü sınırlar.

Doğrudan Frekans Ölçüm Yöntemi

Şekil 140'da doğrudan frekans ölçüm yöntemi düzeneği gösterilmiştir. Bu yöntemde frekans standardının çıkışı bir frekans metre kullanılarak doğrudan ölçülür ve ölçülen veriler bir PC ile analiz edilmek üzere kaydedilir. Bu yöntemde kullanılan frekans metrenin içi osilatörünün doğruluğunu ve kararlılığını artırmak için harici olarak izlenebilir bir başka referans frekans standardı kullanılabilir.



Şekil 140. Doğrudan frekans ölçüm yöntemi düzeneği

PC'den toplanan frekans verilerinin istatiksel ortalaması, DUT çıkış frekansının ortalamasını veya frekans doğruluğunu verirken bu verilerin istatiksel dağılımı (Root Allan Variance) kararlılığı verecektir [88].

$$y_i(\tau) = f_i(\text{ofset}) = \frac{\Delta f}{f_{nominal}} = \frac{f_i - f_{nominal}}{f_{nominal}} \quad (18)$$

$$\bar{y}(\tau) = f(\text{ofset}) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} y_i(\tau) \quad (19)$$

$$\sigma_y{}^2(\tau) = \left[\frac{1}{2(N-1)}\sum_{i=1}^{N-1}(y_{i+1}(\tau) - y_i(\tau))^2\right] \quad (20)$$

f_i : Ölçülen frekans değerleri [Hz]

$f_{nominal}$: Nominal frekans değerleri [Hz]

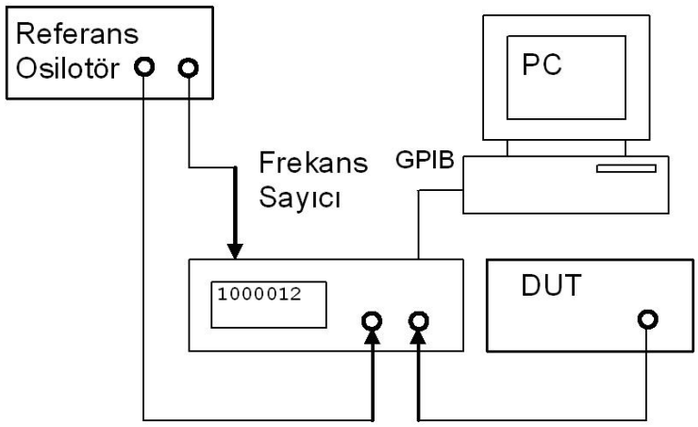
$\sigma_y(\tau)$: τ ortalamalı kararlılık [Hz/Hz]

$y_i(\tau)$: i. frekans ofset veya normalize frekans verisi (i=1,2,3,...,N) [Hz/Hz]

τ : Ölçüm süresi [s]

Faz Ölçüm Yöntemi

Faz ölçüm yönteminde, referans işaretle DUT işaretin arasındaki fazın zamanla değişimi incelenerek, DUT'un ürettiği işaret hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu ölçümde sayıcı, zaman aralığı ölçüm moduna alınarak saniyede bir ölçüm alınması sağlanır. Alınan ölçümler PC'ye kaydedilir.



Şekil 141. Faz ölçüm yöntemi düzeneği

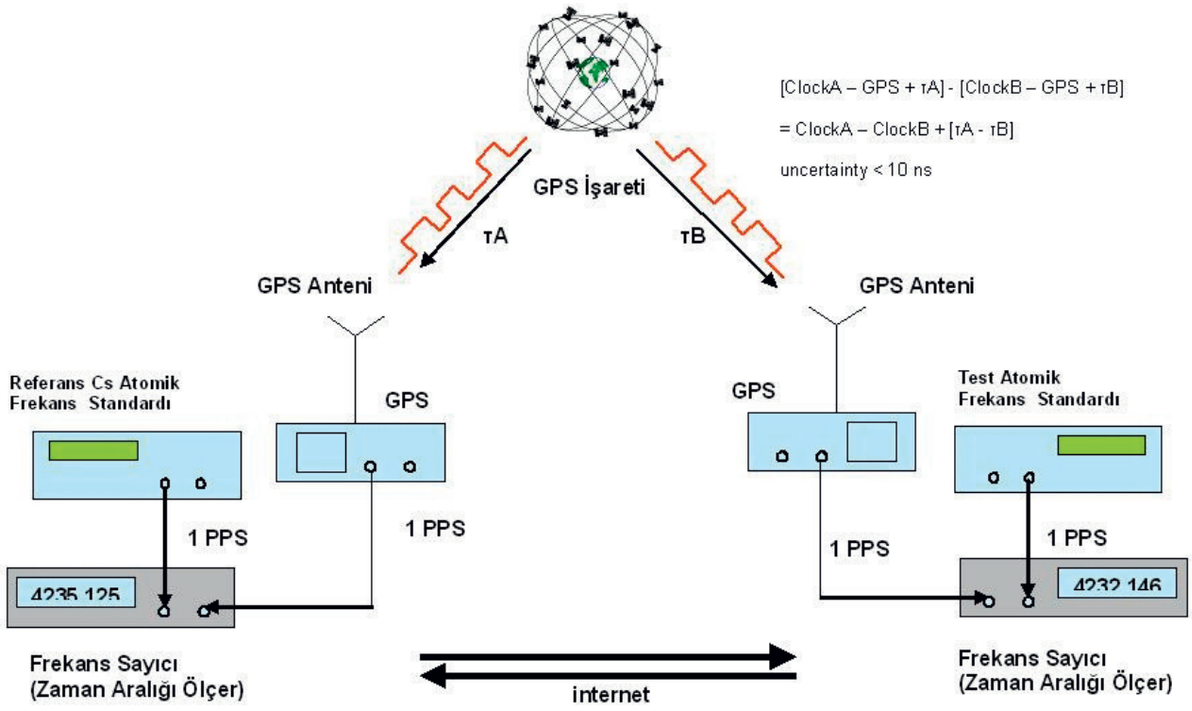
DUT ile referans arasındaki faz farkı sabit ise ve zamanla değişmiyorsa bu iki osilatörün frekansının eş olduğu anlamına gelir. Zamanla değişen bir faz farkı ortaya çıkıyorsa bu iki osilatörün çıkış frekanslarının birbirinden farklı olduğunu gösterir [89].

DUT'un frekans doğruluğu veya frekans ofset değeri Eşitlik (17) ve (19) ile hesaplanabilir. Çıkış kararlılığı ise Eşitlik (20) kullanılarak hesaplanabilir.

Ortak Görüş Yöntemi (CV, Common View) – Uzaktan Karşılaştırma

Şekil 142'de GPS sistemi kullanılarak iki frekans standardının karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu karşılaştırma yöntemine, her iki yerde aynı anda sadece aynı uydu izleniyorsa Ortak Görüş Yöntemi (Common View) denir. Eğer kullanılan alıcılar çok kanallı (aynı anda birçok uydu izleme kapasitesine sahip) ve GPS zaman ölçeği ile eşzamanlı zaman işareti üretebiliyorsa bu durumda bu sistem Görünür Tüm Uydu Yöntemi (All In View) adını alır [90].

Ortak Görüş Yönteminde Şekil 142'de kullanılan her iki GPS zaman alıcısı belirli bir tarifeye göre aynı anda aynı uyduyu izler. Her iki GPS alıcısı da izlediği aynı uydunun zamanı ile eşzamanlı 1 PPS işareti üretirler Bu 1 PPS işareti ile frekans standartlarının ürettiği 1 PPS işareti arasındaki zaman farkı yüksek çözünülürlüklü bir sayıcıyla sürekli ölçülür. Ölçüm sonuçları internet üzerinden yayınlanarak diğer frekans standardının referans saate göre zaman sapması dolayısıyla frekansı hesaplanabilir [91].



Şekil 142. İki frekans standardının GPS sistemi ile karşılaştırılması.

Şekil 142'de referans sistemin GPS uydusu ile ölçümü:

$T(ClockA) - T(GPS_k) + \tau A$ (21)

$T(ClockA)$: ClockA'nın zamanı, referans saat [s]

$T(GPS_k)$: k. GPS uydusunun zamanı [s]

τA : ClockA ile GPS uydusu arasındaki elektromanyetik dalganın ulaşım zamanı [s]

Karşılaştırılan frekans standardının GPS uydusu ile ölçümü:

$T(ClockB) - T(GPS_k) + \tau B$ (22)

Her iki ölçüm birbirinden çıkartılırsa;

$T(ClockA) - T(GPS_k) + \tau A - (T(ClockB) - T(GPS_k) + \tau B) = T(ClockA) - T(ClockB) + (\tau A - \tau B)$

$(\tau A - \tau B) \leq 10$ ns

ClockA ile ClockB arasındaki zaman farkı, 10 ns belirsizlikle hesaplanabilir.

7.3. SICAKLIK VE NEM ÖLÇÜMLERİ

7.3.1 SICAKLIK

Sıcaklık, ısıl kontak halinde olan iki sistemin birbirleriyle ısıl dengeye gelmesi durumunda, iki sistemde de aynı olan büyüklük olarak tanımlanabilir. Sıcaklığı ısıl enerjinin düzeyi ya da ölçütü olarak da tanımlayabiliriz.

Sıcaklık, bilim, teknoloji ve günlük yaşamda çok sık kullanılan kavramlardandır. Sıcaklık ölçümü ve sıcaklık kontrolü, bilimsel çalışmalarda, endüstriyel işlemlerde ve günlük yaşantımızda önemli yer tutmaktadır:

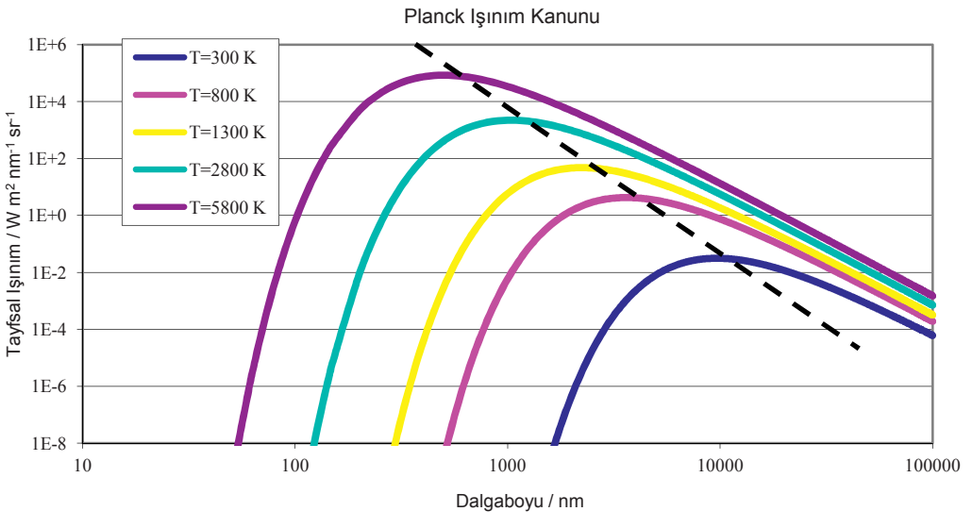
- Endüstriyel işlemlerin çoğunda ürün kalitesini belirleyen en önemli unsurdur.
- Enerji kaynaklarının (petrol veya benzeri doğal kaynaklar) verimli kullanılması için sıcaklık ölçümleri gerekmektedir.
- Sağlıklı ve güvenli bir ortamda yaşamak için çevre şartlarının izlenmesinde sıcaklık en önemli bilgidir.
- Pek çok mekanik, optik ve elektriksel ölçümlerde ölçüm sonucu sıcaklık ile değişir.
- Biyoteknoloji ve meteoroloji dahil, pek çok bilimsel disiplinde sıcaklık vazgeçilmez bir unsurdur.

Kontak sıcaklık ölçümlerinde, sıcaklıkla değişen fiziksel özellikler vasıtasıyla cismin sıcaklığı belirlenir. Sıcaklık metrolojisi alanında ise bu özellikler;

- He gazı için sıcaklık basınç ilişkileri,
- Metallerin dirençlerinin metalin sıcaklığı ile değişmesi,
- Bir telin iki ucundaki sıcaklık farkının, elektriksel potansiyel farkı oluşturması olarak özetlenebilir.

Işınım sıcaklığı ölçümlerinde ise ölçümler,

- Cisimden yayılan ısıl ışınım miktarının sıcaklıkla değişmesi özelliğinden faydalanılarak gerçekleştirilir.



Şekil 143. Planck Işınım Kanunu

Diğer bir ifadeyle, bir yüzeyden gelen ışınım enerjisi kullanılarak bir cismin sıcaklığı, uzaktan ölçülür. Hareketli cisimlerin, tehlikeli ortamların veya uzaktaki cisimlerin sıcaklıkları, hızla değişen veya çok yüksek sıcaklıklar, fiziksel temas mümkün olmadığı için bu teknikle ölçülebilir.

Bütün cisimler atomlarının ısıl hareketleri nedeniyle enerji yayarlar. Cismin sıcaklığı nedeniyle yayılan bu enerji ısıl ışınım olarak adlandırılır. Bütün cisimler çevrelerine ısıl ışınım yayarlar ve çevrelerinden gelen ısıl ışınımı soğururlar. Yoğun haldeki maddelerin (katı veya sıvı) yaydıkları ışınım spektrumda süreklilik gösterir. Bu spektrumun ayrıntıları maddeden bağımsız ve tamamıyla cismin sıcaklığına bağlıdır.

7.3.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Temel yedi SI biriminden biri olan Kelvin (K) evrensel olarak maddenin en iyi tanımlanmış ve tekrarlanabilir hali olan suyun üçlü noktasının termodinamik (mutlak) sıcaklığının 1 / 273,16'sı olarak tanımlanmıştır [92].

Pratikte ise termodinamik sıcaklığın ölçümünün pahalı ve karmaşık sistemler gerektirmesi sebebiyle termodinamik sıcaklığa en yakın şekilde gerçekleştiren evrensel bir ölçek oluşturulmuştur. En son 1990 yılında yapılan düzeltmelerle kabul edilen ve dünyada bütün birincil seviye laboratuvarlar tarafından kullanılan bu ölçek "Uluslararası Sıcaklık Ölçeği" olarak adlandırılır ve "ITS-90" kısaltması kullanılır [93].

Günlük hayatta sıcaklık, Celcius sıcaklığı olarak ifade edilir ve t ile gösterilir. Termodinamik sıcaklık, T, ise Kelvin birimi kullanır ve Celcius birimine dönüşümü aşağıdaki eşitlik ile yapılır.

$t / °C = T / K – 273,15$

7.3.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Sıcaklık metrolojisinde tüm ölçümler Uluslararası Sıcaklık Ölçeği 1990'a (ITS-90) izlenebilir yapılmak zorundadır. Bu ölçek dünyadaki tüm sıcaklık ölçümlerinin doğru, güvenilir ve denk olmasını sağlayan en önemli unsurdur. ITS-90 sıcaklık ölçeği, daha önce kullanılmış olan birçok uluslararası sıcaklık ölçeğinin bugüne dek gelişmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu ölçekler, sıcaklık ölçümlerinin doğru ve tekrarlanabilir bir şekilde yapılmasına ve ölçülen sıcaklığa karşılık gelen termodinamik sıcaklığa en yakın şekilde hesaplanabilmesine olanak verecek şekilde 1968 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği'nin yerine oluşturulmuştur.

ITS-90, alt bölgelerinde tanımlı sabit noktalar ve bu bölgelere ait interpolasyon cihaz ve denklemlerinin kullanıldığı bir sıcaklık ölçeğidir. ITS-90 ölçeği dört ana sıcaklık aralığının bir araya gelmesiyle tanımlandı. Bu sıcaklık aralıkları şöyle belirlendi [93]:

- (0,65 - 5) K arasında ^{3}He ve ^{4}He gaz-basınç ilişkileri,
- (3 - 24,5561) K arasında gaz termometresi,
- (13,8033 - 1234,93) K arasında Platin direnç termometresi
- 1234,93 K'in üzerinde Planck ışınım kanunu interpolasyon cihaz ve eşitlikleri olarak kullanılır.

ITS-90 sıcaklığı 1234,93 K sıcaklığına kadar kontak sıcaklık ölçümleri olarak saf maddelerin faz denge durumları olan on yedi sabit nokta ile tanımlanır. Kontak sıcaklık ölçeğinin oluşturulması, elde edilebilen en yüksek saflığa sahip maddeler ile oluşturulan belirli sıcaklık değerindeki ortamlardan oluşan sabit nokta sıcaklık hücreleri kullanılarak yapılır.

1234,93 K sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda ölçek, tayfsal radyometreler kullanılarak gümüş, altın veya bakır metallerinin herhangi birinin sıvı-katı faz geçiş dengesi sıcaklığına sahip olan referans siyah cisimler kullanılarak oluşturulur.

ITS-90'da radyasyon sıcaklığı ölçeğinin başlangıç noktası olarak gümüş donma noktası (961,78 °C) belirlenmiş ve referans nokta olarak ise gümüş, altın ve bakır noktalarından herhangi birinin seçilebileceği belirtilmiştir.

ITS-90, gümüş donma noktasının (961,78 °C) üzerindeki sıcaklık ölçümlerini, radyasyon sıcaklığı ölçeği olarak, Eşitlik (23) ile tanımlar [93]:

$$\frac{L_\lambda(T)}{L_\lambda(T_x)} = \frac{\exp(\frac{c_2}{\lambda T_x}) - 1}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1} \qquad (23)$$

T : ITS-90 sıcaklık değerleri [K]

T_x : Gümüş, altın ve bakırdan herhangi birinin donma noktası [K]

λ : Dalgaboyu [nm]

c_1 : Birinci radyasyon sabiti

c_2 : İkinci radyasyon sabiti

$c_2 = h\,c / k = 1{,}4388 \times 10^{-2}$ [m K]

Bu eşitliğe uygun olarak bir radyasyon sıcaklığı ölçeği oluşturmamız için yapılması gereken, monokromatik (tek dalga boyunda çalışan) bir radyasyon termometre ile üç sabit noktadan herhangi birindeki siyah cisim ışınımını ölçmek ve diğer sıcaklık değerlerine karşılık gelen termometre değerlerini de denklemi ve termometrenin özelliklerini kullanarak hesaplamaktır. Bunun için de temelde iki cihaza ihtiyaç duyarız: Monokromatik bir radyasyon termometresi ve bir sabit nokta siyah cisim kaynağı.

Ölçek eşitliği, sıcaklığı tanımlamak için tayfsal ışınım oranlarını kullanmanın idealize edilmiş halidir. Uygulamada ise, bütün monokromatik radyasyon termometrelerin belirli bir bant genişliği olduğundan, bu oran, şu şekilde yazılmalıdır:

$$r = \frac{\int L_\lambda(T)\,\tau_C(\lambda)\,\tau_i(\lambda)\,s(\lambda)\,d\lambda}{\int L_\lambda(T_{Ag})\,\tau_C(\lambda)\,\tau_i(\lambda)\,s(\lambda)\,d\lambda} = \frac{\int L_\lambda(T)\,S(\lambda)\,d\lambda}{\int L_\lambda(T_{Ag})\,S(\lambda)\,d\lambda} \qquad (24)$$

$\tau_i(\lambda)$: girişim (interference) filtrenin tayfsal geçirgenliği,

$\tau_C(\lambda)$: radyasyon termometrenin içindeki bütün diğer optik parçaların tayfsal geçirgenliği,

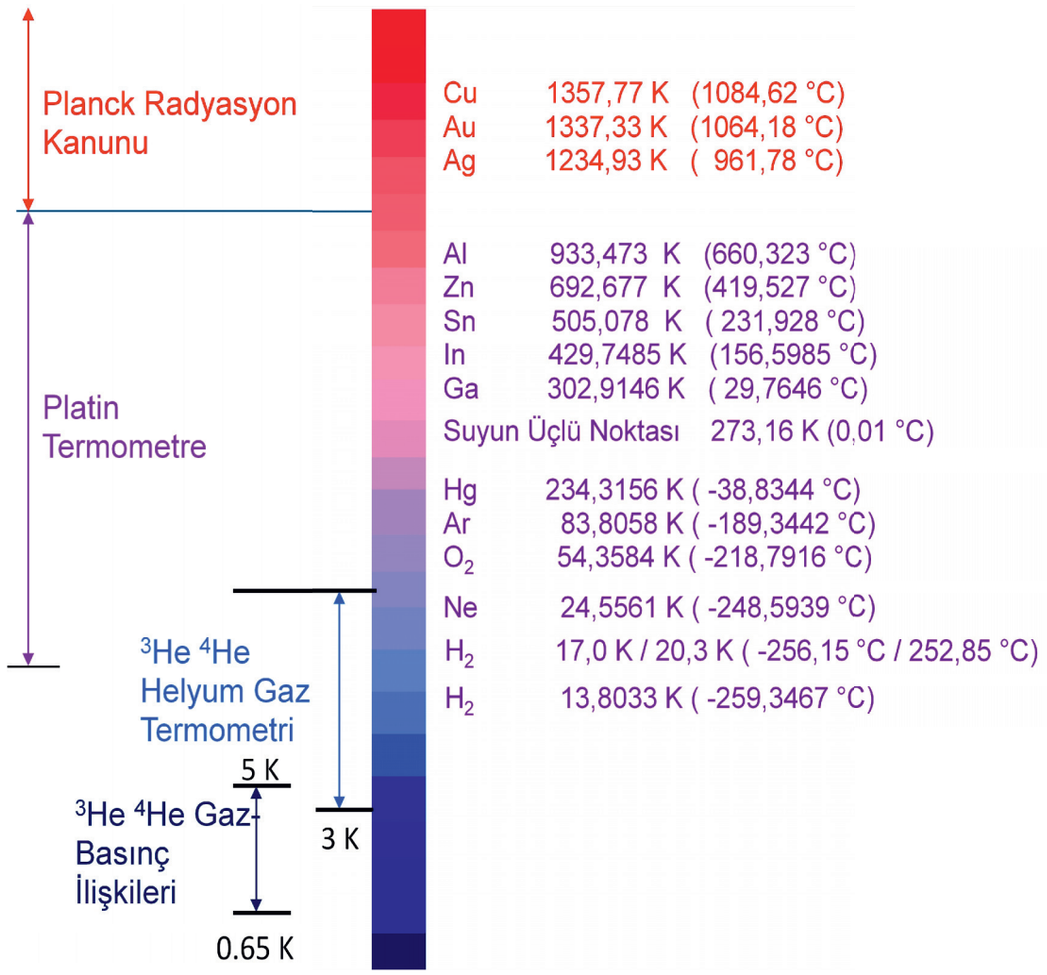
$s(\lambda)$: detektörün tayfsal tepkisi,

$S(\lambda)$: radyasyon termometrenin bir bütün olarak tayfsal tepkisi

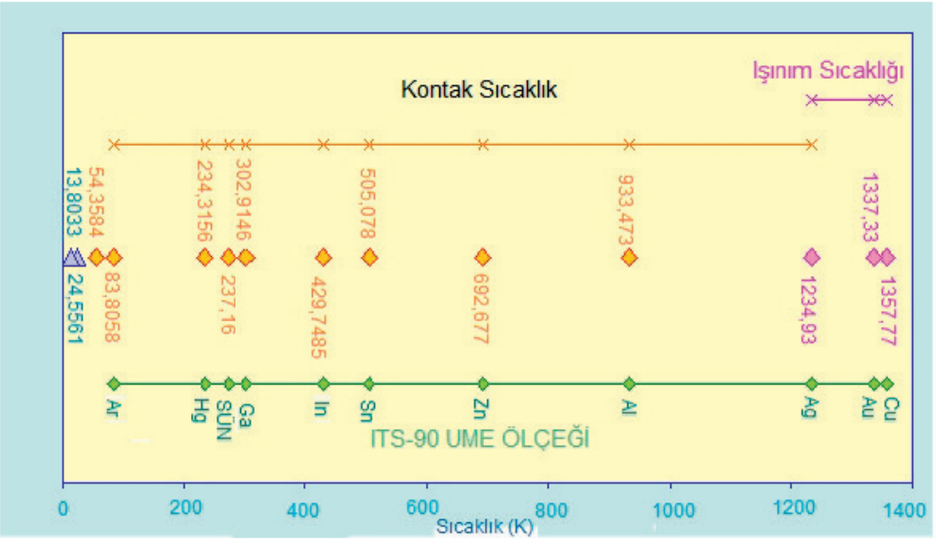
Eşitlik (24) yardımıyla ölçeğin oluşturulması için, termometrenin gümüş (ya da altın veya bakır) donma noktalarında kalibrasyonu ve termometre tayfsal tepki fonksiyonunun belirlenmesi gerekir. Radyasyon termometre, gümüş, altın ya da bakır sabit nokta siyah cisimlerinin karşısına yerleştirilip, donma platosu sinyalleri belirlenir. Bu sinyal, tayfsal tepki, doğrusallık ve hedef çapı etkileri ölçümlerinden kaynaklı düzeltmeler yapılarak ITS-90 denklemi kullanılarak ölçek oluşturulur.

Geleneksel yöntemde, ölçeğin saklanması kararlı tungsten şerit lambalarda yapılır. Tungsten lambaların endüstriyel kullanımı giderek azalmaktadır. Alternatif metot olarak ölçek, ölçeğin oluşturulduğu referans termometre üzerinde saklanabilir. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerle, kararlılık açısından termometreler lambalara denk hale gelmiştir. Ölçek termometre üzerinde saklanıyorsa, termometre periyodik olarak kalibre edilmeli, olası kaymalar ve değişmeler belirlenmelidir.

Başka bir yöntem de ölçeğin değişken sıcaklıklı siyah cisim üzerinde saklanmasıdır. Burada, siyah cisim (gösterge değerleri) referans radyasyon termometreyle kalibre edilir. Ancak bu yöntemde belirsizlik değerleri yüksek olacaktır. Yine eğer bu metot kullanılacaksa, siyah cismin açıklık sıcaklık dağılımı, gösterge değerlerinin tekrarlanabilirliği ve tekrar elde edilebilirliği, sıcaklık kararlılığı çok iyi belirlenmelidir.



Şekil 144. ITS-90 uluslararası sıcaklık ölçeği



Şekil 145. ITS-90 UME sıcaklık ölçeği

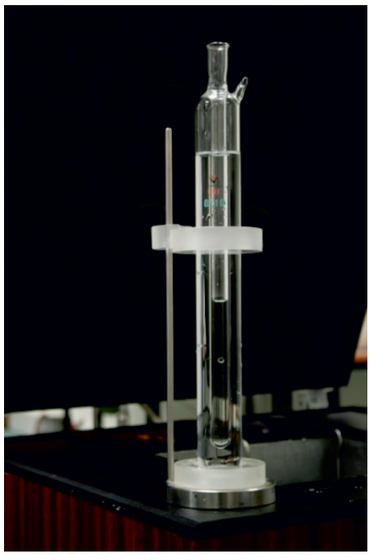
Ölçüm Standartları

Kontak sıcaklık ölçümlerinde referans ölçüm standardı olarak Sabit Nokta Sıcaklık Kaynakları ve Referans Termometreler kullanılır. Direnç termometresi, ısılçift, sayısal termometreler de kullanılan transfer standartlardandır [94].

Sabit Nokta Sıcaklık Kaynakları

Sabit nokta sıcaklık kaynağı, istenildiğinde tekrarlanabilir faz değişimine sahip saf metallerin ve metalin sıcaklık değişiminin sağlanması için gerekli sıcaklık ortamının bir arada bulunduğu sistemdir. Bu sistemde termometreler vasıtasıyla faz değişim sıcaklığı izlenir ve kaydedilir. Kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak üç çeşit sabit nokta mevcuttur [95]. Bunlar;

- **Donma noktası:** Donma noktaları bulundukları ortamın basıncından çok içerdikleri safsızlığa daha duyarlıdırlar.
- **Ergime noktası:** Bunların da donma noktalarında olduğu gibi çok az basınç bağımlılıkları vardır. Safsızlıklara karşı ise duyarlıdırlar.
- **Üçlü nokta:** Saf maddelerin üçlü nokta faz sıcaklıkları aynıdır ve katı, sıvı ve gaz fazlarının dengesine bağlıdır. Üçlü nokta aynı zamanda buhar basıncındaki donma veya ergime noktası olarak da tanımlanabilir. Üçlü noktalar genellikle havası boşaltılmış kapalı hücreler içinde gerçekleştirilir.

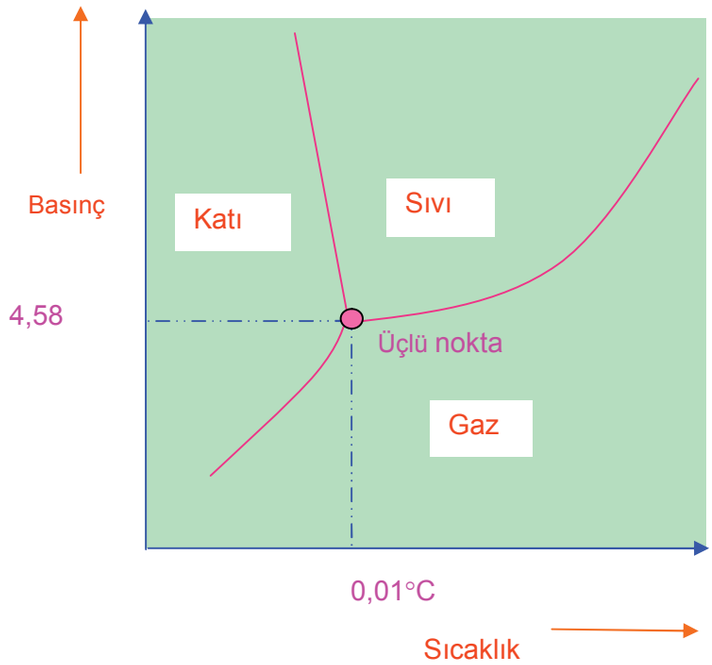


Şekil 146. UME yapımı sabit nokta

Suyun Üçlü Noktası (SÜN)

Suyun üçlü noktası diğer ITS-90 sabit noktalarından farklı kullanım özelliklerine ve kullanım sıklığına sahiptir.

- Termometre herhangi bir şekilde fiziksel zorlanma ile karşı karşıya kaldığında (basit bir çarpma, istenmeyen sıcaklıklara maruz kalma gibi) termometrenin SÜN değeri tekrar ölçülür.
- Termometrelerin kararlılığını ölçmek için kullanılır. Bu şekilde termometrelerin sıcaklık değerlerindeki kayma SÜN değerinin tekrar ölçülmesi ile tespit edilir.
- SPRT kullanılarak ITS-90 ölçeğinin oluşturulması sırasında her sabit nokta ölçümünden sonra mutlaka SÜN değeri ölçülür ve ITS-90 ile tanımlanan oran değerleri hesaplanır. Bu şekilde SPRT ölçümleri standart hale getirilir.



Şekil 147. Suyun Üçlü Noktası (SÜN) faz diyagramı

Referans Termometre

Referans termometrenin seçiminde aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- Sıcaklık aralığı
- Sıcaklık kaynağı
- Ulaşılmak istenen belirsizlik

Referans termometrenin ulusal ölçüm standartlarına izlenebilir olması gereklidir. İzlenebilirlik iki şekilde sağlanabilir:

- Referans termometrenin doğrudan ulusal metroloji enstitüsünde kalibrasyonu,
- Referans termometrenin akredite bir kalibrasyon laboratuvarında kalibrasyonu.

Eğer kalibrasyon laboratuvarı kalibrasyon hizmeti vermek amacıyla kurulmuş ise referans termometrenin standart platin direnç termometresi (SPRT) olması önemlidir. SPRT'nin sağlanamaması durumunda, kararlık değeri en düşük ve buz noktası değeri standartlara en yakın olan direnç termometresi kullanılmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda referans termometre olarak ısılçiftler kullanılabilir.

Kontak sıcaklık ölçümlerinde referans termometre olarak kullanılabilen cihazlar, standart platin direnç termometre (SPRT), Platin direnç termometre (Pt-100) ve Platin bazlı ısılçiftdir.

Standart Platin Direnç Termometreler (SPRT) referans olarak kullanılan platin direnç termometrelerdir. Referans olarak kullanılacak termometrelerde aktif direnç uzunluğunun 5-6 cm ve kılıflı termometre uzunluğunun sabit noktalarda kalibre edilebilmelerine imkan verecek şekilde en az 50 cm olmasına dikkat edilmelidir. Standart platin termometrelerin çalışma aralığı 13,8 K ile 1234,93 K aralığını kapsar. Bu çalışma aralığında üç farklı tipte SPRT kullanılır:

- 13,8 K ile 273,16 K (0,01 °C) arasında genellikle 25 Ω değerinde (273,16 K'deki değeri) kapsül tipi termometreler,
- -189 °C ile 660 °C arasında 25 Ω değerinde uzun termometreler (long stem),
- 0 °C ile 961,78 °C aralığında yüksek sıcaklık termometreler (genellikle 273,16 K sıcaklık değerinde 0,2 Ω ve 2,5 Ω değerinde)



Şekil 148. Standart platin direnç termometre

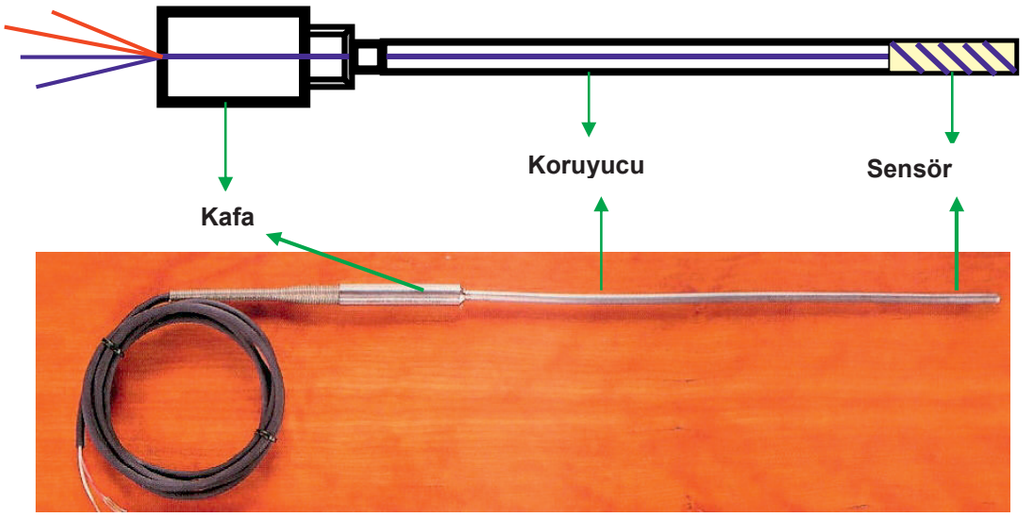
ITS-90'a göre standart termometrelerin kalibrasyonlarının yapılabilmesi için standart termometreler ITS-90 ile tanımlanmış şartları sağlamalıdır.

Platin Direnç Termometre (Pt-100) tipi platin direnç termometreleri genellikle -200 °C ile +650 °C sıcaklık aralığında kullanılır. Yüksek saflıkta 100 Ω'luk dirence sahip platin telin, özel sarım teknikleri kullanılarak sarılması ile Pt-100 sensörler elde edilir ve bu sensörler koruyucu tüp içine yerleştirilerek muhafaza edilir. Pt-100 termometreler 2, 3 veya 4 direnç teli ile uzatma yapılarak okuma cihazına bağlanabilir. Bu termometrelerin 0 °C'deki nominal direnç değeri 100 Ω'dur. Bundan dolayı genelde endüstriyel platin direnç termometreleri, Pt-100 (100 Ω'luk dirence sahip Platin tel) olarak bilinmektedir. Belirsizlik değerleri (20 - 50) mK aralığındadır. Amaca göre çok değişik boyut ve şekillerde olabilir [96].

Platin direnç termometrelerinde direnç değerleri, Ω olarak okunur. Sıcaklığa duyarlı olan direnç termometrelerinden okunan bu elektriksel değer, daha sonra Callendar van Dusen, ITS-90 denklemleri ya da polinom eğrisi kullanılarak sıcaklığa (°C) çevrilir.

Platin direnç termometresinin yapımında kullanılan platin malzemedeki yabancı atomların, termometrenin okuduğu direnç (dolayısıyla sıcaklık) değerine önemli ölçüde etki etmektedir. Termometre yapımında kullanılan malzeme ne kadar saf olursa, termometrenin okuduğu direnç değeri o kadar kararlı ve tekrarlanabilir olur.

Pt-100 termometre seçiminde α değeri, platin malzeme içerisindeki saflık miktarını tespit açısından önemli bir faktör olarak karşımıza çıkar.



Şekil 149. Platin direnç termometre

En saf platinden elde edilen Pt-100 termometresinin α değerinin 0,000392 Ω/mK olması beklenir. Yapımı tamamlanan her Pt-100 termometresi, her ülkenin belirlediği standartlara göre farklı değerlerle sınıflandırılırlar. Sınıflandırma işlemi termometrelerin sıcaklığı bilinen referans termometrelere karşılık, göstermiş olduğu direnç değerlerinin kararlılığına göre yapılır. Sınıflandırma sonucunda termometrenin hangi sınıfa ait olduğunu gösteren denklemler belirlenir.

Isılçiftler endüstrinin en yaygın kullandığı sıcaklık ölçerlerdir. Kullanılacak sıcaklık aralığına göre farklı çeşitleri vardır. Sadece tellerin birleşme ucunda değil bütün tel boyunca sıcaklığı algılamakta ve toplam bir tepki olarak gerilim yaratmaktadır. Hemen hemen her tip ısılçift saf metallerden değil de alaşımlardan yapıldığı için referans olarak kullanılmaları uygun değildir. Yüksek sıcaklık platin termometrelerinin kullanım sıcaklıklarının üstünde (960 °C) kullanılırlar.

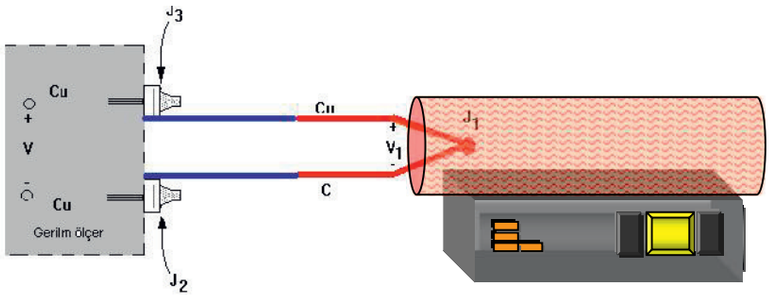
600 °C sıcaklık değerinin üstündeki yüksek sıcaklıklarda R ve S tip ısılçiftler, 1450 °C'ye kadar kullanılabilir. B tipi ısılçiftler ise 1700 °C'ye kadar kullanılabilir. Kalibrasyon belirsizlikleri 1100 °C'ye kadar 0,2 °C, 1450 °C' ye kadar 1 °C, daha yüksek sıcaklıklarda ise 2 °C'dir.

Son yıllarda platin ve paladyum (Pt/Pd) alaşımından yapılan ısılçiftler yaygın olarak kullanılır. Bu tip ısılçiftler, yüksek sıcaklık kalibrasyonlarında referans olarak kullanılmaktadır.

Isılçift ölçümlerinde en çok karşılaşılan kavram olan "Termoelektrik Kuvvet" aşağıda açıklanmıştır:

Eğer metal telin bir ucu ısıtılırsa, sıcak uçta kinetik enerjisi artan serbest elektronların hareketi nedeniyle telin iki ucu arasında bir potansiyel fark oluşur. Bu yüzden uygulamalarda ölçülen değerin birimi potansiyel fark, elektromotor kuvvet (emk) veya gerilim olarak karşımıza çıkar. SI birim sistemine göre ölçüm birimi Volt'tur. Bahsedilen bu emk değeri değişik metallerden yapılan

ısılçiftler için değişik büyüklüklere sahiptir. Hatta aynı tipteki ısılçiftin yüksek sıcaklıkta tavlanması veya gerilmiş olmasına göre emk değeri değişim gösterir. Bu gerilim sıcaklığın değil, iki uç arasındaki sıcaklık dağılımın bir fonksiyonudur ve etkisi iletkenin yapısal özelliklerine bağlıdır. İki farklı metal telin her iki uçları birbirleri ile bağlanır ve bağlanan uçlardan bir tanesi ısıtılır ise oluşan bu termoelektrik devreden, ısıtma işlemi süresince bir elektrik akımı geçer.



Şekil 150. Termoelektrik akım devresi

Eğer termoelektrik devrenin ısıtılmayan diğer bağlantı noktasında teller birbirinden ayrılırsa, açık devrenin net potansiyel farkı kullanılan metal tellerin cinsine ve ısıtılan bağlantı noktasının sıcaklığına bağlı olur. Oluşan bu emk değeri Seebeck gerilimi olarak adlandırılır.

Sıcaklıktaki küçük değişimler Seebeck gerilimi ile doğru orantılı olarak değişir.

$$dE = S(T)\, dT \qquad (25)$$

S(T) : Telin kendine özgü Seebeck katsayısıdır.

Eşitlik (25)'den çıkarılacak en önemli yorum; dT'nin sıcaklık farkından değil, sıcaklık dağılımından oluştuğudur. Yani tel boyunca sıcaklık değişir. Bunu Eşitlik (26)'daki gibi yazabiliriz.

$$dE = S(T,x)(dT/dx) \qquad (26)$$

Tel boyunca S (T, x) fonksiyonu, genellikle eş dağılıma sahip değildir. Bu durum devredeki bağlantılardan, istenmeyen gerilim veya aşınmadan dolayı olabilir. Isılçifti oluşturan iletkenlerin sıcaklık değişimi uygulanan bölgelerinde, kimyasal ve fiziksel olarak özdeş olmaları çok önemlidir. Bağlantı noktalarının eş sıcaklık alanları içerisinde bulunmasına dikkat edilmelidir.

Telin her bir parçasının fiziksel ve kimyasal olarak aynı ortamda, özdeş olduğu varsayılırsa aşağıdaki iki teorem kullanabilir.

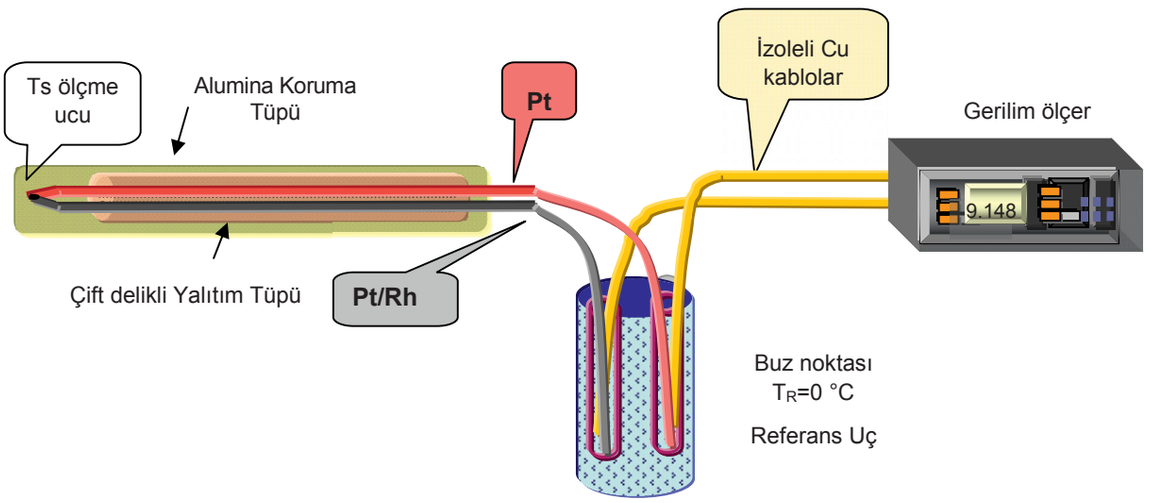
- Eğer sıcaklık dağılımı yok ise, dT/dx =0 (izotermal çevre durumu), Seebeck gerilimi oluşmayacaktır.
- Eğer tel homojen ise, S(T,x) = S(T) olur, o zaman Seebeck gerilimi telin iki ucundaki sıcaklıkların fonksiyonudur.

Kalibre edilen ısılçiftten okunan ölçüm sonuçları gerilim ölçer kullanılarak gerçekleştirilebilir. Multimetre, DC gerilim, AC gerilim, DC akım, AC akım ve DC direnç ölçen bir ölçüm cihazıdır. Diğer bir ifadeyle bir multimetre, ampermetre, gerilim ölçer ve ohmmetrenin bütün fonksiyonlarını yerine getiren bir ölçüm cihazıdır.

Gerilim ölçeri seçerken istenilen çözünürlük ve belirsizlik limitleri içerisinde olmasına ve periyodik kalibrasyonlarla izlenebilirliliğinin sürekliliğine dikkat edilmelidir.

Termoelektrik akımın büyüklüğü, iki uç arasındaki sıcaklık farkıyla, bir başka deyişle sıcaklık değişiminin büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Böylece referans sıcaklık noktası, buz nokta sıcaklık değeri (0 °C) seçilerek tüm ısılçift emk değerleri bu noktaya göre belirlenebilir. Bu yüzden referans bağlantı noktası, soğuk uç olarak da adlandırılabilir. Yaygın uygulama da bu yöndedir. Referans buz nokta sıcaklık değeri, buz ve su karışımından kolaylıkla oluşturulabilen, belli bir süre için sıcaklığı ve homojenliği değişmeyen, düşük belirsizlik değerine sahip bir sıcaklık kaynağıdır. Referans olarak buz nokta sıcaklığı seçiminin en önemli nedeni; evrensel olarak kabul edilmiş olan tüm ısılçift tablolarının 0 °C'yi referans sıcaklık olarak kabul etmesi ve en düşük ölçüm belirsizliklerine ancak bu sıcaklık kaynağının kullanımıyla ulaşılabilmesidir. Diğer bir yöntem olarak; ısılçiftlerden alınan elektriksel ölçüm değerine, ısılçiftin tipine ait referans tabloda yer alan referans bağlantı sıcaklık değerine (ortam sıcaklığı) karşılık gelen gerilim değerini eklemektir. Referans bağlantı olarak buz nokta sıcaklık değeri kullanmadan yapılan bu tür düzeltmelerde toplam ölçüm belirsizliğinin artacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

İdeal bir durum için ısılçift bağlantıları aşağıdaki gibi verilebilir. Oluşturulan ölçme ucu, seramik koruma kılıfı içine konulup, ısılçifti oluşturan tellerin yine seramik tüp içinde yalıtılarak, referans buz noktasına kadar uzanmasına izin verilir. Buz noktasında ısılçift telleri bakır teller ile birleştirilir. Bakır tellerin, gerilim ölçerin bakır girişlerine bağlanması ile ölçüm devresi tamamlanır.



Şekil 151. Platin bazlı ısılçift örneğinde buz noktasının referans noktası olarak kullanılarak elektriksel bağlantılarının yapılması

Ara metaller kanunu kullanılarak herhangi bir ısılçift termoelektrik devresindeki fazladan bağlantı noktaları ortadan kaldırılabilir. Bu kanunun kısa açıklaması; Şekil 151'de görüldüğü gibi iki farklı metalin (A, B metalleri) arasında üçüncü (C metali) ve diğer ikisinden farklı bir metal bulunduğunu düşünelim. Ortadaki C metalin, A ve B metali ile bağlantı yaptığı her iki ucu da aynı sıcaklığa sahip ise C metalinin ısılçift devresine herhangi bir katkısı yoktur [97].

Sayısal Termometre

Platin termometrelerin sıcaklık değişimine tepkileri direnç olarak, ısılçiftlerin ise gerilim olarak ortaya çıkar. Bu çıkışları belli bir işlemciden geçirdikten sonra sıcaklık olarak gösteren, bir sıcaklık algılayıcısı ve işlemci / göstergeden oluşan sistemler, sayısal termometre olarak adlandırılır. Sayısal termometreler sonuçlar bir işlemciden geçtiği ve daha önceden belirlenen ve şimdiki durumu için tam olarak uygun olmayan bazı sabitler ve fonksiyonlar kullandığı için belirsizlikleri yüksektir.

Kontak sıcaklık ölçümlerinde kullanılan kararlı sıcaklık ortamları, Banyolar, Kuru Fırınlar ve Buz Noktası ile sağlanır.

Banyolar

Banyolar ikincil seviye karşılaştırmalı kalibrasyonlarda kullanılır. Tablo 15'de banyolarda kullanılan sıvılar, sıcaklık aralıkları ve elde edilebilecek en iyi sıcaklık dağılımları verilmiştir.

Banyolarda referans olarak SPRT kullanılıyorsa banyonun en kritik özelliği sıcaklık dağılımının her noktada aynı olmasıdır. Banyo aynı zamanda referans olarak kullanılıyorsa o zaman hem sıcaklık kontrolünün iyi olması hem de sıcaklık ölçerinin kalibreli olup banyonun sıvı sıcaklığını iyi bir şekilde yansıtması gerekir. Bu nedenle banyolar kullanılarak yapılan kalibrasyonlarda sadece sıcaklık ölçerlerin kalibrasyonu yeterli olmayıp, üç boyutlu sıcaklık dağılımının yapılarak belirsizliğe yansıtılması şarttır.

Tablo 15. Kalibrasyonda kullanılan banyolar ve sıcaklık aralıkları

Banyo Tipi	Sıcaklık Aralığı	Sıcaklık Dağılımı
Alkol banyosu	-60 °C … 4 °C	± (0,002 – 0,005) °C
Su banyosu	4 °C … 90 °C	± (0,002 – 0,01) °C
Yağ banyosu	150 °C … 250 °C	± (0,005 – 0,010) °C
Tuz banyosu	250 °C … 550 °C	± (0,01 – 0,05) °C

Kuru Fırınlar

Kuru fırınların banyolara göre kullanımları daha kolaydır. Geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilirler. Genellikle banyolara göre daha hızlıdırlar. Kuru fırınların sıcaklık dağılımları çıkartılmalıdır. Kuru fırınların derinliği, kalibre edilecek termometreler için uygun olmalıdır.

Buz Noktası

Distile su ve aynı sudan elde edilen kırık buz ile doldurularak homojen bir karşımın elde edildiği termos, ısılçiftlerin referans bağlantılarını daldırmak için ya da termometrelerin buz noktası ölçümleri için uygun bir banyodur.

Işınım sıcaklık ölçümlerinde kullanılan referans standartlar, Sabit Nokta Siyah Cisim Kaynağı ve Monokromatik Radyasyon Termometresidir. Işınım sıcaklığı ölçümlerinde Değişken Sıcaklık Siyah Cisim Kaynakları transfer standart olarak kullanılır.

Bu cihazlar ile ilgili bilgilendirmeden önce "Siyah Cisim", "Siyah Cisim Kavitesi" ve "Emisivite" kavramları hakkında kısa açıklamalar aşağıda verilmiştir.

Siyah Cisim

Yaydığı ısıl ışınımı evrensel karakterde olan bir çeşit cisim vardır. Üzerlerine düşen bütün ışınımı soğuran bu cisimler siyah cisim olarak adlandırılır. Farklı sıcaklıklardaki tüm siyah cisim spektrumları aşağıdaki özellikleri taşır [98]:

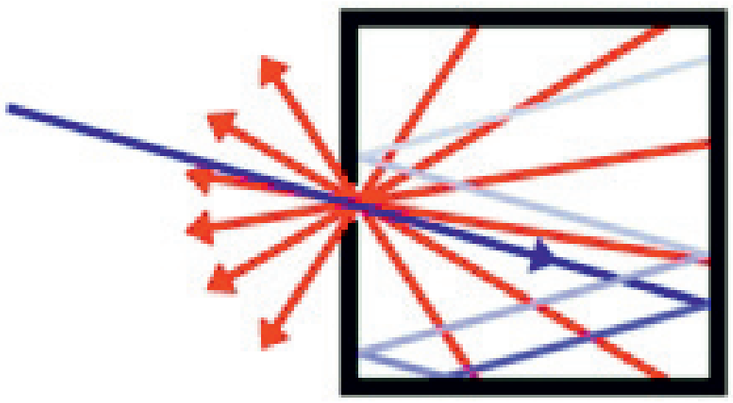
- Her sıcaklık değeri için ışınımın en yüksek olduğu belli bir dalga boyu vardır ($\lambda_{max}T = 2898$ μm K).
- En yüksek ışınımın olduğu dalga boyu (λ_{max}), sıcaklık arttıkça daha kısa dalga boylarına doğru kayar.
- Bu dalga boyundan kısa dalga boylarına doğru gidildikçe ışınım çok hızlı azalır.
- Uzun dalga boylarına doğru gidildikçe ise daha yavaş olarak ışınımın azaldığı görülür.
- λ_{max} değeri, sıcaklık arttıkça daha kısa dalga boylarına doğru kayar.
- Grafikte eğrilerin kapsadığı alan, toplam ışımayı verir. Sıcaklık arttıkça toplam ışınım da artar.

T sıcaklığındaki siyah cismin λ dalga boyundaki spektral ışıması, $L_\lambda d\lambda$, Planck eşitliğiyle verilir.

$$L_\lambda \, d\lambda = (c_1 / \pi) \, \lambda^{-5} \, [\exp (c_2 / \lambda T) - 1]^{-1} \, d\lambda \qquad (27)$$

Siyah Cisim Kavitesi: Tanımı gereği siyah cisim, soğurduğu ve yaydığı radyasyon eşit olan cisimlerdir. Siyah cisimlere örnek olarak bir kaviteden yayınan ışınım verilebilir.

Dışarıya küçük bir delikle açılan bir kavite düşünelim. Bu kavitenin deliğinden içeriye giren ışınım yansıyarak kavitenin duvarlarına çarpacak ve eninde sonunda soğurulacaktır. Eğer deliğin alanı, kavite iç alanına oranla çok küçük ise kaviteye gelen ışınımın ihmal edilebilir bir kısmı delikten yansımalar nedeniyle kaçacak, temel olarak kaviteye gelen bütün ışınım soğurulacaktır. Deliğin üzerine düşen ışınımın tamamı soğuruluyorsa, delik bir siyah cismin yüzeyi gibi davranmalıdır. Siyah cisimler genelde bu prensipler çerçevesinde üretilirler.



Şekil 152. Siyah cisim kavitesi

Kavitenin çeperlerinin her yerde aynı olacak şekilde t sıcaklığına ısıtıldığında, çeperler bütün kaviteyi dolduran bir ısıl ışınım yaymaya başlayacaktır. Bu ışınımın küçük bir parçası delikten dışarı çıkacak böylece delik ısıl ışınım kaynağı olarak davranacaktır. Delik, siyah cisim yüzeyi gibi davranacağına göre siyah cisim karakteristiğinde ışıma yapacaktır. Delik, kaviteyle aynı ısıl davranışta olduğuna göre, kavite içindeki ışınım da siyah cisim karakteristiğinde olacaktır. Sistemin sıcaklığı da t olduğuna göre bu tayf, t sıcaklığında bir siyah cismin ışımasında olmalıdır.

Sonuç olarak, duvarları t sıcaklığına getirilmiş bir kavitenin içindeki ışınım, t sıcaklığındaki bir siyah cismin yüzeyinden yayılan ışınımla aynı karakteristiğe sahiptir. Pratikte bir fırın içine yerleştirilen, dışında deliği olan bir kaviteyle siyah cisim tayfı elde etmek çok yaygındır. Siyah cisim ışınımı üzerine yapılacak teorik çalışmalarda da, kavite ışınımını incelemek tercih edilir. Çünkü bu ışınımın özelliklerini çok genel bazı çıkarımlarla tahmin etmek mümkündür [99].

Emisivite: Cisimlerin gerçek siyah cisim davranışına yakınlıkları emisivite ile ifade edilir. Emisivite, cismin tayfsal ışıma yoğunluğunun, aynı sıcaklıktaki siyah cisim tayfsal ışıma yoğunluğuna oranı olarak belirlenir. Sıcaklık ve dalga boyuna göre değişen emisivite, ideal siyah cisimde 1 değerini alır, diğer cisimlerde 0 ile 1 aralığında değişkendir.

Pratikte bir yüzeyden yayılan ışınım yukarıdaki eşitliklerden hesapladığımız ışınımdan farklıdır. Emisivite olarak bilinen bir etkeni bu eşitliklere katmak gerekir. Bu Planck ve Wien eşitliklerinde tayfsal emisivite, ε_λ, Stefan eşitliğinde ise toplam emisivitedir, ε. Böylece,

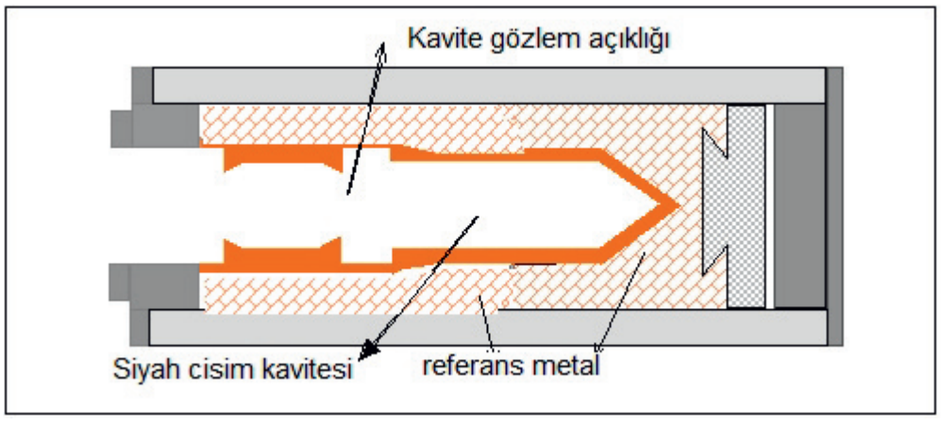
$$L'_T(\lambda) = \varepsilon_\lambda \frac{c_1}{\pi}\frac{1}{\lambda^5}\frac{1}{e^{c_2/\lambda T}-1} \approx \varepsilon_\lambda \frac{c_1}{\pi}\frac{1}{\lambda^5}\frac{1}{e^{c_2/\lambda T}} \qquad (28)$$

$$\varepsilon\, L^{BB}_\lambda(T)\, d\lambda = L'_\lambda(T')\, d\lambda \qquad (29)$$

Sabit Nokta Siyah Cisim Kaynağı

Radyasyon sıcaklık ölçeğini birincil seviyede oluşturmak istediğimizde, bunu sabit nokta siyah cisimler üzerinden gerçekleştiririz. Bu şekildeki siyah cisimler, eş dağılımlı bir ısıtıcının içine yerleştirilmiş olan kavitenin içinde ITS-90 ölçek tanımında belirtilen gümüş, altın ya da bakır metallerini ergitme-dondurma metoduyla çalışırlar. Metalin içine yerleştirildiği potanın kavite ile mükemmel ısıl denge halinde olması gerekir. Donma anındaki ışıma yoğunluğu monokromatik radyasyon termometresi ile ölçülerek ITS-90 ölçeği için gerekli olan referans sinyal elde edilir. Daha sonra da ara sıcaklıklara denk gelen ışıma yoğunlukları denklemden çıkarılarak ölçek birincil seviyede oluşturulur.

Aşağıda böyle bir siyah cisim kaynağının kavite kısmı gösterilmiştir. Tipik kavite boyu 50 mm ile 80 mm, kavite açıklığı ise 1 mm ile 6 mm arasındadır.



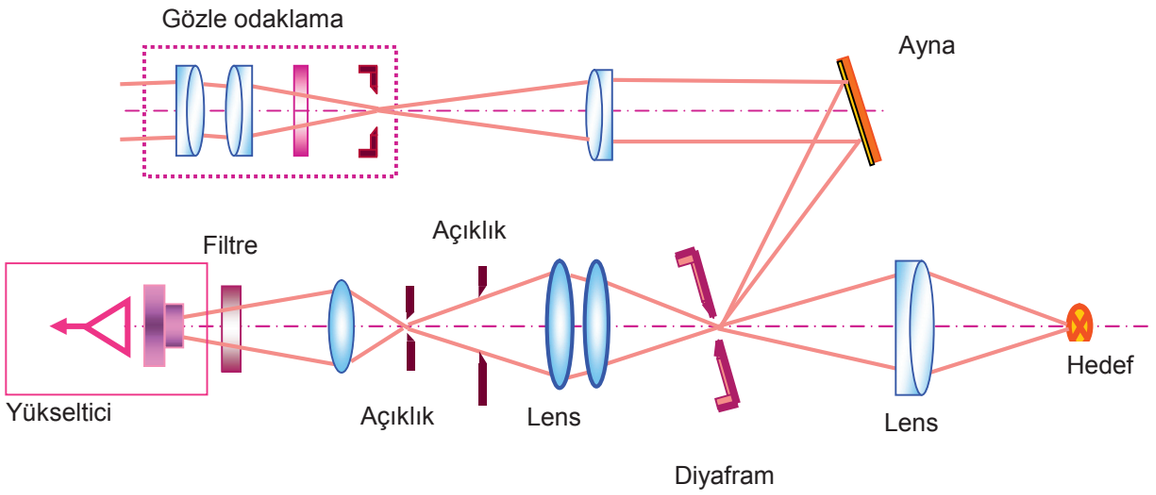
Şekil 153. Siyah cisim kavitesi

Termometre ile ölçülen sıcaklığın gerçekten metalin ergime sıcaklığı olması için metal ile grafit arasında çok iyi bir ısıl iletişim olması gerekir. Kavite ve kavite açıklığı, kaviteden yayılan enerjinin mümkün olduğunca Planck kanunuyla ifade edilebilmesine olanak verecek şekilde tasarlanır.

Monokromatik Radyasyon Termometresi

Monokromatik termometre, bir ön optik (aynalar, mercekler, açılıklar v.b.) yardımıyla, kaynak üzerindeki belli bir hedef alanından ışınımı toplayan, önüne monokromatik ışınımı sağlaması için girişim filtresi yerleştirilen ve bu ışınımı bir silikon fotodetektör ya da foto çoklayıcı tüp (PMT) üzerine düşüren optoelektronik bir sistemdir. Detektör çıktısı uygun şekilde yükseltilerek ölçek hesaplamalarında kullanılır.

Radyasyon termometreleri (pirometreler), radyometreden (radyometre = mercek, ayna, apertür vb. + girişim filtresi + detektör) okunan fiziksel değerleri (akım, gerilim), çoğunlukla bir düzeltme faktörü de içererek, sıcaklık bilgisine dönüştüren cihazlardır. Şekilde sıcaklığı ölçülmek istenen yüzey, detektör görevi gördüğü için özellikle termometrenin bir parçası olarak belirtilir. Ana çalışma prensibi bu yüzeyden ışınımı toplamak, girişim filtresi yardımıyla istenen dalga boylarını seçmek ve detektör ile sinyal toplama sistemiyle ölçmektir.



Şekil 154. Radyasyon termometre iç yapısı

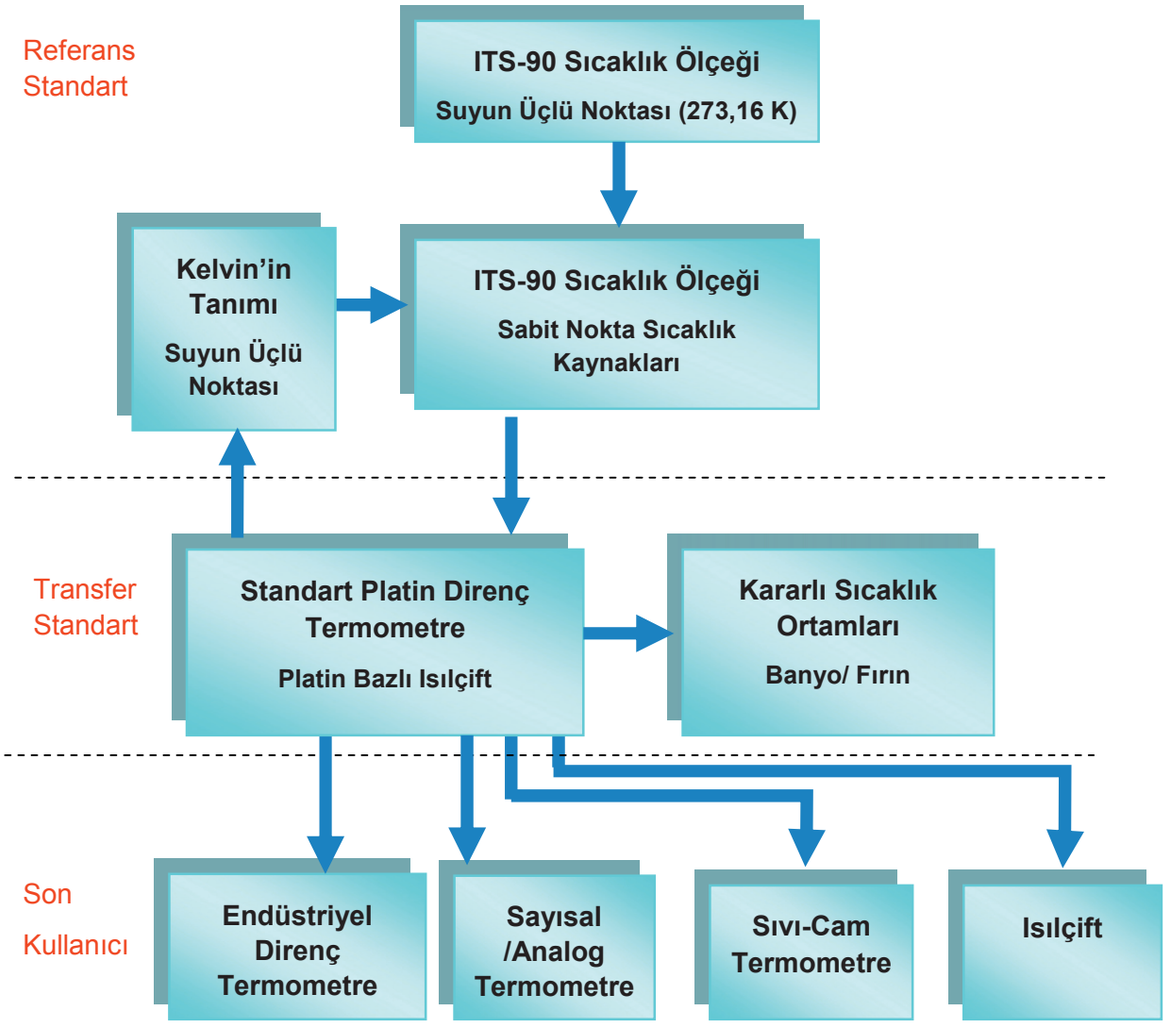
Değişken Sıcaklık Siyah Cisim Kaynakları

Siyah cisimler ikincil düzeyde radyasyon sıcaklık kalibrasyonlarında da kullanılır. Radyasyon termometrelerin kalibrasyonu için değişken sıcaklık siyah cisim kaynakları kullanılır. Bu tür siyah cisimler, temelde emisivitesi 1'e yakın olacak şekilde tasarlanmış bir kavite, kavitenin etrafını saran ve duvarların sıcaklığını artırma ya da azaltma işleminde kullanılan bir sistem ve bu sistemi kontrol etmek amacıyla kavite duvarlarına dıştan değecek şekilde yerleştirilen bir sıcaklık sensöründen oluşurlar. Bu tür siyah cisimler kalibreli bir radyasyon termometresiyle kalibre edilirler ve diğer ikincil seviye radyasyon termometrelerin kalibrasyonunda kullanılırlar.

Sıcaklık Ölçümlerinde İzlenebilirlik Zinciri

Herhangi bir ölçüm esnasında elde edilen sonuçların ulusal veya uluslararası standartlarla oluşan bir zincir içerisinde bağlantılı olması izlenebilirlik olarak tanımlanabilir.

Sıcaklık ölçümlerindeki izlenebilirlik zinciri Şekil 155'de verilmiştir.



Şekil 155. Sıcaklık ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri

7.3.2 NEM

Nem ölçümleri, ürün kalitesinin artması, maliyetin azaltılması, insan rahatlığı ve sağlığının sağlanması için laboratuvar ve endüstride yapılan çalışmalar ile üretim kontrolünde gün geçtikçe artan bir önem kazanır. Örneğin, pamuğa dayalı endüstride uygulanan nem kontrolü pamuk ürünlerinin kalitesini önemli derecede etkiler. Büyük market veya depolardaki nem kontrolü ise çeşitli metalleri paslanmaktan ve gıda maddelerini bozulmaktan korur. Nem kontrolü; ameliyathane, hastane odaları ve kuvözlerin iklimlendirilmesinde, meteoroloji ölçümlerinde, otomobil emisyon ve hava kirliliği ölçümlerinde ve ozon deliği çalışmalarında insan sağlığı ile rahatlığı açısından önem taşır.

Nem ölçümlerinde, bağıl nem ölçerler ve çiy-noktası sıcaklık ölçerler hava ya da bir gazın içindeki nem miktarının tespiti için sıklıkla kullanılır. Rutubet ölçerler ise tahta, tekstil v.b. katı maddelerin içindeki su miktarının tayini için kullanılmaktadır [100][101].

7.3.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Nem, havanın veya bir gazın içindeki su buharı miktarını belirten niceliktir. Nem ölçümlerinde kullanılan birimler, kullanılan cihaza ve yönteme göre değişiklik gösterir.

Nem ölçümü yaparken “bağıl nem” ve “çiy-noktası sıcaklığı” en sık kullanılan parametrelerdir. Aşağıda bağıl nem ve çiy-noktası sıcaklığı tanımları, eşlik eden formüller ve kullanılan SI birimleri verilmiştir.

Nem ölçümlerinde sıcaklık, basınç, akış hızı ve kütle ölçüm birimleri kullanılır. Birinci seviye ölçüm cihazı olarak çiy-noktası sıcaklık ölçer kullanılır. Birinci seviye nem kaynağı olarak kullanılan cihazlarda çiy-noktası sıcaklığı, su buhar basıncı, akış hızı ve kütle ölçümleri ile izlenebilirlik sağlanır.

Bağıl Nem

Bağıl nem kapalı bir hacimde ve aynı sıcaklıktaki kısmi su buhar basıncının doymuş su buhar basıncına oranıdır.

Eşitlik (30)’da genel bağıl nem formülü verilmiştir.

$$\%\,\mathrm{rh} = \frac{e_{w\,\text{kısmi}}(t)}{e_{w\,\text{doyma}}(t)} \times 100 \qquad (30)$$

$e_{w\,\text{kısmi}}(t)$: kısmi su buhar basıncı [Pa]

$e_{w\,\text{doyma}}(t)$: doymuş su buhar basıncı [Pa]

İki-basınç nem sistemleri için kullanılacak bağıl nem formülü ise Eşitlik (31)’de verilmiştir [102]. Eşitlikte basınç ve sıcaklık SI birimleri olarak Pascal (Pa) ve Kelvin (K) kullanılır.

$$\%\,\mathrm{rh} = \frac{f_w(P_s, t_s)}{f_w(P_c, t_c)} \frac{e_w(t_s)}{e_w(t_c)} \frac{P_c}{P_s} \times 100 \qquad (31)$$

$f_w(P_s, t_s)$: İyileştirme faktörü (enhancement factor)

t_s : Su buharı doyma sıcaklığı [K]

t_c : Su buharı kabin sıcaklığı [K]

P_c : Kabin basıncı [Pa]

P_s : Doyma basıncı [Pa]

Bağıl nem değeri havanın sıcaklık ve basınç değerlerine bağlıdır. Sıcaklık arttıkça havanın su buharı tutma kapasitesi de artar. % 100 bağıl nem değeri, havanın taşıyabileceği su buharı miktarını tam kapasite ile taşıdığını anlatır. Hava su buharı ile doymuş durumdadır. Bu duruma daha fazla su buharı eklendiğinde yoğunlaşma gözlenir. İçerdiği nem miktarı değiştirilmeden, % 100 bağıl nem değerindeki havanın sıcaklık değeri artırıldığında bağıl nem değerinde düşüş gözlenir. Sıcak havanın su buharı tutma kapasitesi soğuk havaya kıyasla daha fazla olduğu için bağıl nem değerinde düşüş gözlenir. % 50 bağıl nem değeri, havanın taşıyabileceği su buharı miktarının yarısını taşıdığını belirtir. Sıcaklık azaldıkça havadaki su buharı miktarı değişmez. Fakat düşük sıcaklıktaki havanın taşıyabileceği su buharı miktarı daha az olduğu için bağıl nem artar.

Çiy-Noktası Sıcaklığı

Nem ölçümlerinde birinci seviye ölçümler çiy-noktası sıcaklık ölçümleri ile gerçekleştirilir. Çünkü bu cihazlar (sıcaklık ölçümü) kullanılarak elde edilen nem ölçüm belirsizlikleri, diğer nem cihazları (bağıl nem, basınç, akış hız ya da kütle ölçümü yapan cihazlar) ile yapılan ölçümler ile karşılaştırıldığında en düşük belirsizlik değerlerine sahiptir.

Çiy-noktası sıcaklığı ölçümleri, sıcaklık ölçümüne dayanır. Ölçüm yapılacak hava ya da gazın soğutularak su ve su buharının termodinamik denge durumunda iken oluşturduğu sıvı ya da katı haldeki yoğunlaşmanın (çiy ya da kırağı oluşumu) meydana geldiği yüzeyde ölçülen sıcaklık çiy- ya da kırağı-noktası sıcaklığı olarak adlandırılır. Çiy-noktası sıcaklığı 0 °C'den yüksek sıcaklıkları, kırağı-noktası sıcaklığı ise 0 °C'den düşük sıcaklıkları tanımlamak için kullanılır. Çiy/kırağı-noktası sıcaklığında oluşan su buhar basıncı, doyma su buhar basıncına eşittir.

Havanın basınç ve sıcaklık değerleri sabit olduğu sürece hava, çiy-noktası sıcaklık değerinden daha düşük bir sıcaklık değerine soğutulamaz.

Çiy-noktası sıcaklığı ölçümleri ölçüm yapılan hava ya da gazın basınç değerine bağlıdır. Bazı durumlarda basınç değeri dikkate alınarak çiy-noktası sıcaklık değerinde düzeltme yapılması gereklidir.

İki-basınç nem sistemleri için kullanılacak çiy-noktası sıcaklığı formülü Eşitlik (32) ve (33)'de verilmiştir. Eşitlikte basınç ve sıcaklık SI birimleri olarak Pascal (Pa) ve Kelvin (K) kullanılır.

$$e_w(t_d) = \frac{f_w(P_s, t_s)\, e_w(t_s)\, P_c}{f_w(P_c, t_d)\, P_s} \tag{32}$$

$$t_d = t \,|\, e_w(t_d) \tag{33}$$

$$e_w(t) = \exp\left\{ \left[\sum_{i=0}^{6} \left(C_i (t + 273{,}15)^{i-2} \right) \right] + D \ln(t + 273{,}15) \right\} \tag{34}$$

Eşitlik (32) ile çiy-noktası sıcaklığındaki su buhar basıncı hesaplanır. Bu değere karşılık gelen çiy-noktası sıcaklık değeri ise Eşitlik (33) kullanılarak ve Eşitlik (34) ile verilen su buhar basıncı formülünün tersten çözümlenmesi ile hesaplanır [103][104][105][106].

Rutubet İçeriği

Rutubet içeriği, katı ya da sıvı içindeki su miktarını tanımlar ve rutubet ölçer cihazlar kullanılarak ölçülür. Bu cihazların çalışma prensibi ölçüm yapılacak malzemenin içerdiği su miktarı ile gözlenen kapasitans ya da direnç değişimine dayanır. Ölçüm yapılacak malzeme tahta, tekstil malzemesi, kâğıt, plastik, ilaç hammaddesi, arpa, mısır gibi taneli gıda ürünleri ve çeşitli sıvılar olabilir.

Bu cihazların kalibrasyonları standartlara uygun olarak fırında kurutma yöntemi ve kütle ölçümleri ile gerçekleştirilir.

Kalibrasyon sırasında ölçülen kütle değerleri kullanılarak rutubet içeriği hesaplanır.

7.3.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Nem ölçümleri, su buhar basıncı dikkate alındığında 10^9 değerinde çok geniş bir aralıkta yapılır. Dolayısıyla bu aralık için değişik sensör (algılayıcı) ve cihazlar gerekir. Bunun sonucunda değişik nem ölçüm cihazları ve yöntemleri ortaya çıkmıştır.

Sayısal, mekanik ve diğer bağıl nem ve sıcaklık ölçerler ile çiy-noktası sıcaklık ölçerlerin kalibrasyonlarında kullanılan cihazlar aşağıda verilmiştir:

- Nem kaynakları
- Çiy-noktası sıcaklık ölçer
- Bağıl nem ölçer

Referans olarak nem kaynağı kullanılabilir. Bu durumda nem kaynağı, ulusal enstitüye izlenebilir olarak kalibre edilmelidir.

Referans olarak çiy-noktası ölçer de kullanılabilir. Kararlılık ve tekrarlanabilirlik açısından tercih edilen çiy-noktası ölçer, ulusal enstitüye izlenebilir olarak kalibre edilmelidir. Referans çiy-noktası ölçer kullanılarak nem kabini kalibre edilir [107].

Referans olarak bağıl nem ölçer de kullanılabilir. Bu durumda referans bağıl nem ölçer kullanılarak nem kabini kalibre edilir.

Çok daha yüksek belirsizliklerle kullanıcının kendi nem ölçerini kalibre edebilmesini sağlayan bir diğer yöntem ise doymuş tuz eriyiklerinin kullanılmasıdır. Ancak bu sistemde referans bir bağıl nem ölçer olması gerekli görülmektedir.

Referans cihazların seçimi değişik faktörlere bağlıdır.

- Ölçüm yapılacak hava hattının özellikleri,
- Kalibrasyonu yapılacak cihazın özellikleri,
- Nem ve sıcaklık aralığı,
- Ulaşılmak istenen ölçüm belirsizlik değeri.

Nem Kaynakları

Bilinen su buharı miktarı, bağıl nem ya da çiy-noktası sıcaklık değeri üretmek için değişik yöntemlerle çalışan nem kaynakları kullanılır.

- İki-basınç nem kaynakları
- İki -sıcaklık nem kaynakları

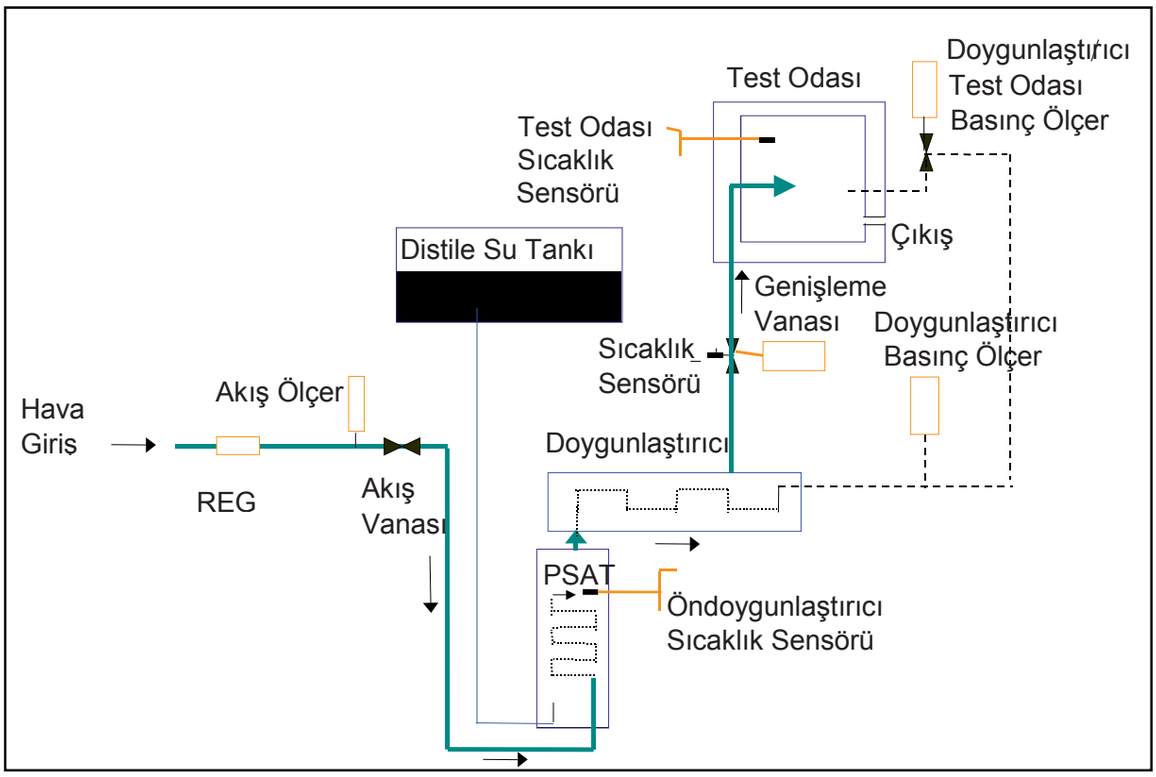
- İki-akış nem kaynakları
- Doymuş tuz eriyikleri
- İklimlendirme kabinleri

İki-basınç, iki-sıcaklık, iki-akış yöntemi ile çalışan nem kaynakları ile doymuş tuz eriyikleri kullanılarak elde edilen nem sabit noktaları günümüzde kullanılan nem kaynakları arasındadır. Bunların yanı sıra referans olarak çiy-noktası sıcaklık ölçerlerin ya da bağıl nem ölçerlerin kullanıldığı iklimlendirme kabinleri de nem kaynağı olarak kullanılır.

Pek çok ulusal metroloji laboratuvarı, düşük belirsizlikleri nedeniyle iki-sıcaklık ya da iki-basınç ilkesine göre çalışan nem kaynakları kullanırlar.

İki-Basınç Nem Kaynakları

Bu tip kaynaklarda, yüksek basınçtaki hava akımı, istenen sıcaklıkta doygun duruma getirilir ve sonra aynı sıcaklıkta fakat daha düşük basınçtaki, genellikle ortam basıncındaki nem odasına bırakılır. İdeal şartlarda doygunlaştırıcı ve nem odasındaki sıcaklık değeri aynıdır. Fakat kullanılan sistemler ideal olmadığı için her zaman doygunlaştırıcı ve nem odasındaki sıcaklık ve basınç ölçülerek bağıl nem hesaplanır.

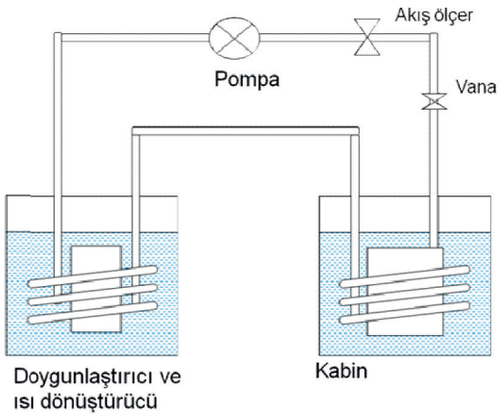


Şekil 156. İki-basınç yöntemi ile çalışan nem kaynağı sistemi

İki-Sıcaklık Nem Kaynakları

İki-sıcaklık yönteminde, düşük sıcaklıktaki hava, su buharı ile doygun duruma getirilir ve sonra havanın sıcaklığı aynı basınçta istenen sıcaklığa yükseltilir.

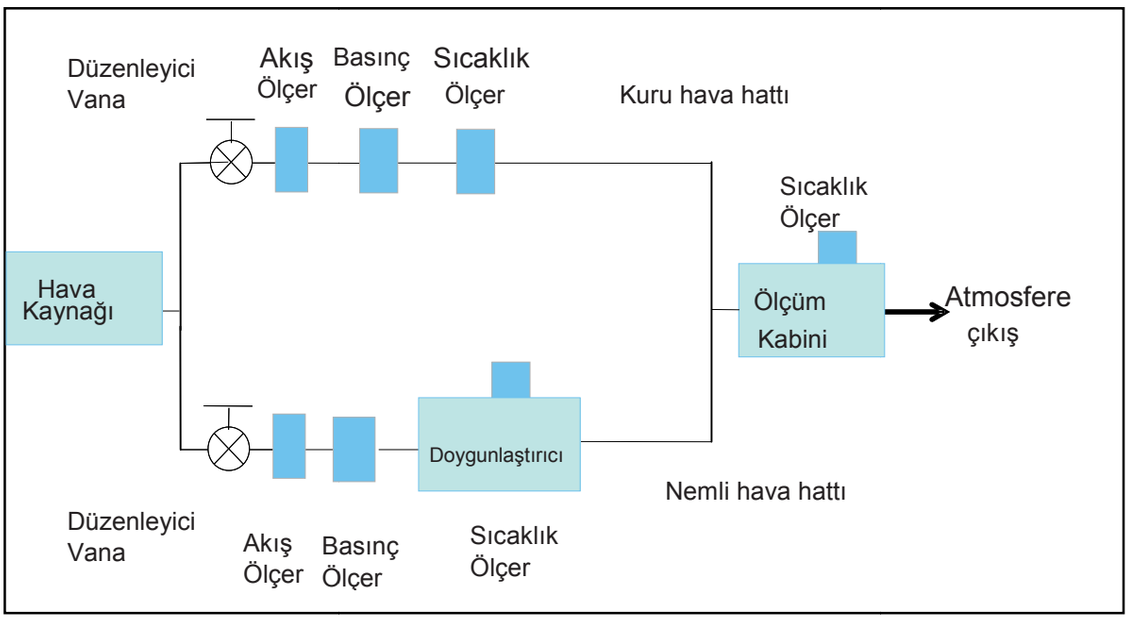
İki-sıcaklık yöntemi kullanılarak, düşük sıcaklık kırağı-noktası sıcaklıklarında (-10 °C ile -100 °C kırağı-noktası sıcaklık aralığında) ve yüksek çiy-noktası sıcaklıklarında (0 °C ile 90 °C çiy-noktası sıcaklık aralığında) nem kaynakları yapılmaktadır.



Şekil 157. İki-sıcaklık yöntemi ile çalışan sistem

İki-Akış Nem Kaynakları

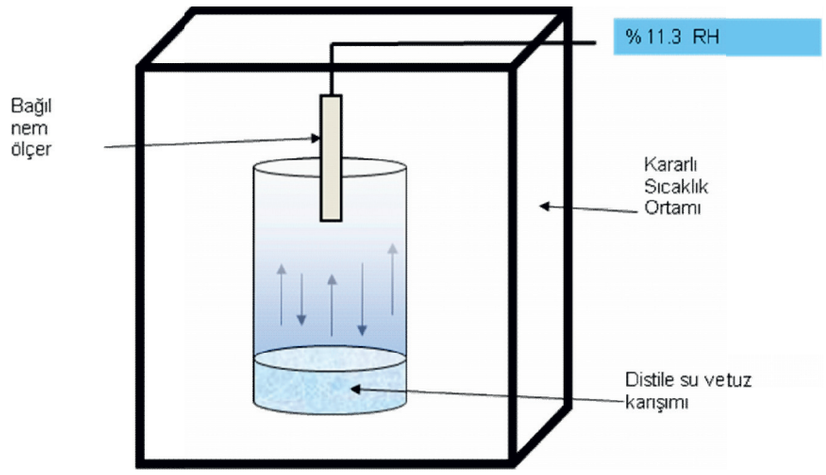
Bu yöntemde hava, kuru ve nemli hava olmak üzere iki kısma ayrılarak iki ayrı hava akışı oluşturulur. Nemli hava, doygunlaştırıcı sistemde suya veya buza göre doygun duruma getirilir. Ölçümler iki akışın birleştirildiği hava hattının çıkışında yapılabileceği gibi ölçümlerin gerçekleştirileceği nem odasında da yapılabilir. Test odasındaki bağıl nem, iki hava akışının bilinen akış oranları kullanılarak hesaplanabilir. Bu yöntem diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha basit olduğu için birçok kuruluş tarafından tercih edilmekte, çeşitli üniversiteler ile laboratuvarlarda da kullanılır.



Şekil 158. İki-akış yöntemi ile çalışan sistem

Doymuş Tuz Eriyikleri

Doymuş tuzlar, kararlı derişime sahip oldukları için uygun şartlar altında belirli sabit değerlerde bağıl nem değerlerini üretirler. Örneğin, potasyum sülfat 20 °C'de % 98 bağıl nem değeri üretirken, lityum klorür aynı sıcaklıkta % 11 bağıl nem değeri üretir. Bu değerler, tuzun kimyasal yapısına, tuzun yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlıdır. Bu metot yapım ve kullanım kolaylığından dolayı uzun yıllardır uygulanmaktadır.



Şekil 159. Tuz eriyikleri ile yapılan ölçüm

İklimlendirme Kabinleri

İklimlendirme kabinleri nem kaynağı olarak kullanıldığında referans nem ölçer olarak çiy-noktası sıcaklık ölçer ya da bağıl nem ve sıcaklık ölçer kullanılmalıdır.

Nem Ölçerler

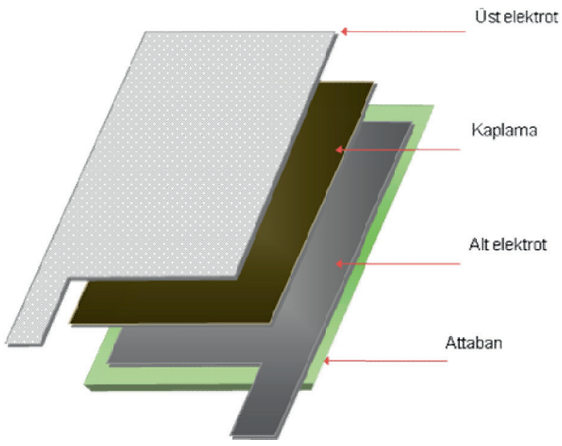
a) Empedans ya da Direnç Sensörlü Bağıl Nem ve Sıcaklık Ölçer (Hygrometer)
b) Mekanik Nem Ölçer
c) Islak/Kuru-Hazneli Nem Ölçer (Wet/Dry Bulb Aspirated Hygrometer; Psychrometer)

a) Empedans, Direnç Sensörlü Bağıl Nem Ölçer (Hygrometer)

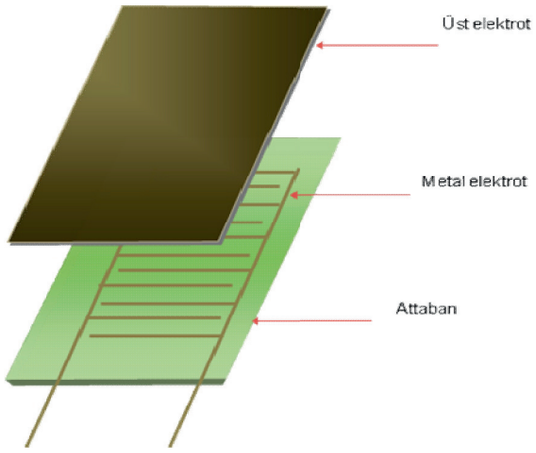
Bu tip sensörler su moleküllerini emerek bunu elektriksel değişim olarak algılayan su tutucu materyallerden yapılır. Bu tür nem ölçüm sensörleri elektriksel empedans, direnç veya dielektrik sabiti değişimine dayanan yöntemlerle tasarlanırlar.

Empedans ve direnç sensörler bağıl neme çiy-noktasından daha iyi yanıt verirler. Yüksek bağıl nem değerlerinde doğruluğu iyidir. Ancak yoğunlaşmayı tolere etmezler ve zarar görebilirler. Bu yüzden yoğunlaşmayı önlemek amacıyla ek donanımları vardır. Belirsizlikleri % 2 rh ile % 3 rh aralığındadır.

Empedans Sensörlü Bağıl Nem Ölçer: Empedans bağıl nem sensörü ana bileşenleri Şekil 160'da verilmiştir. İletken bir malzeme (alt elektrot) ile gözenekli iletken malzeme (üst elektrot) arasına polimer ya da metal oksit malzemenin cam, seramik ya da silisyum alt taban üzerine kaplanması ile kapasitör oluşturulur. Ara katmanda bulunan malzeme, su moleküllerini malzeme içinde tutar, su molekülleri daha sonra gözenekli üst elektrota doğru sızar. Malzemenin dielektrik sabiti, su molekülleri ile değişir ve böylece iki elektrodun kapasitans değerinin artmasına sebep olur. Kapasitans bağıl nem değeri ile doğrusal ilişkilidir.



Şekil 160. Empedans bağıl nem sensörü ana bileşenleri



Şekil 161. Direnç bağıl nem sensörü ana bileşenleri

Direnç Sensörlü Bağıl Nem Ölçer: Direnç bağıl nem sensörü ana bileşenleri Şekil 161'de verilmiştir. Direnç bağıl nem sensörü oluşturmak için ilk önce alt taban metal elektrot oluşturmak üzere kaplanır. Daha sonra alt taban, iletken polimer ya da tuz gibi neme duyarlı bir malzeme ile kaplanır.



Şekil 162. Mekanik nem ölçer



Şekil 163. Rutubet ölçer

b) Mekanik Nem Ölçer

Mekanik nem ölçerler, nem ile genleşen veya büzüşen organik materyalleri kullanarak ölçüm yaparlar. Algılayıcı eleman insan saçı, tekstil ürünü veya plastik olabilir. Uzunluktaki değişimin genliği arttırılarak grafik üzerindeki kaleme iletilir. Bu tip cihazlar ucuzdur ve sürekli kayıt yapıldığında kayıtları saklama kolaylığı vardır. Fakat nem değişimini yavaş algılar, kayma (hysteresis) gözlenir ve taşınma sırasında kolayca bozulabilirler. Bu nedenlerden dolayı kalibrasyon ve izlenebilirlik için uygun değildir. Belirsizlikleri % 5 rh ile % 10 rh aralığındadır.

Rutubet Ölçerler

Rutubet, sıvı veya katıların içinde bulunan su miktarı olarak tanımlanır. Malzeme içindeki su miktarının kuru malzemenin kütlesine oranı olarak ifade edilir. Rutubet, malzemenin direnç/kapasitans değerinin değişimi, mikrodalga ve kızılaltı ışık kullanılarak ölçülür. Kapasitans tipi rutubet ölçerler, rutubet oranı ve malzeme (tahta v.b.) ile malzeme içindeki suyun dielektrik özelliklerini kullanarak ölçüm yaparlar.

c) Islak/Kuru Hazneli Nem Ölçer (Wet/Dry Bulb Aspirated Hygrometer; Psychrometer)

Islak/kuru-hazneli nem ölçerler, iki eş termometre ve hava akımını sağlayan bir pervaneden meydana gelir. Havanın kuru-hazne sıcaklığı hava ile doğrudan temas halindeki bir termometre ile ölçülür. Bu termometre dışarıdan gelebilecek radyasyon (güneş ışığı, lamba v.b.) ve nemden etkilenmeyecek şekilde korunmuştur. Termometrenin diğeri ise sensörü, devamlı ıslaklığı sağlayacak bir fitil (pamuklu kumaş) ile çevrelenmiştir. Cihazda bulunan pervane çalıştırılarak ıslak termometre soğutulur. Islak-hazne sıcaklığı, pervane ile soğutulma sonucunda elde edilen sıcaklık değeridir.

Islak termometrenin okuduğu sıcaklık ile ıslatılmamış, normal ortam sıcaklığını okuyan termometre sıcaklığı kullanılarak bağıl nem değeri elde edilir.



Şekil 164. Psikometre

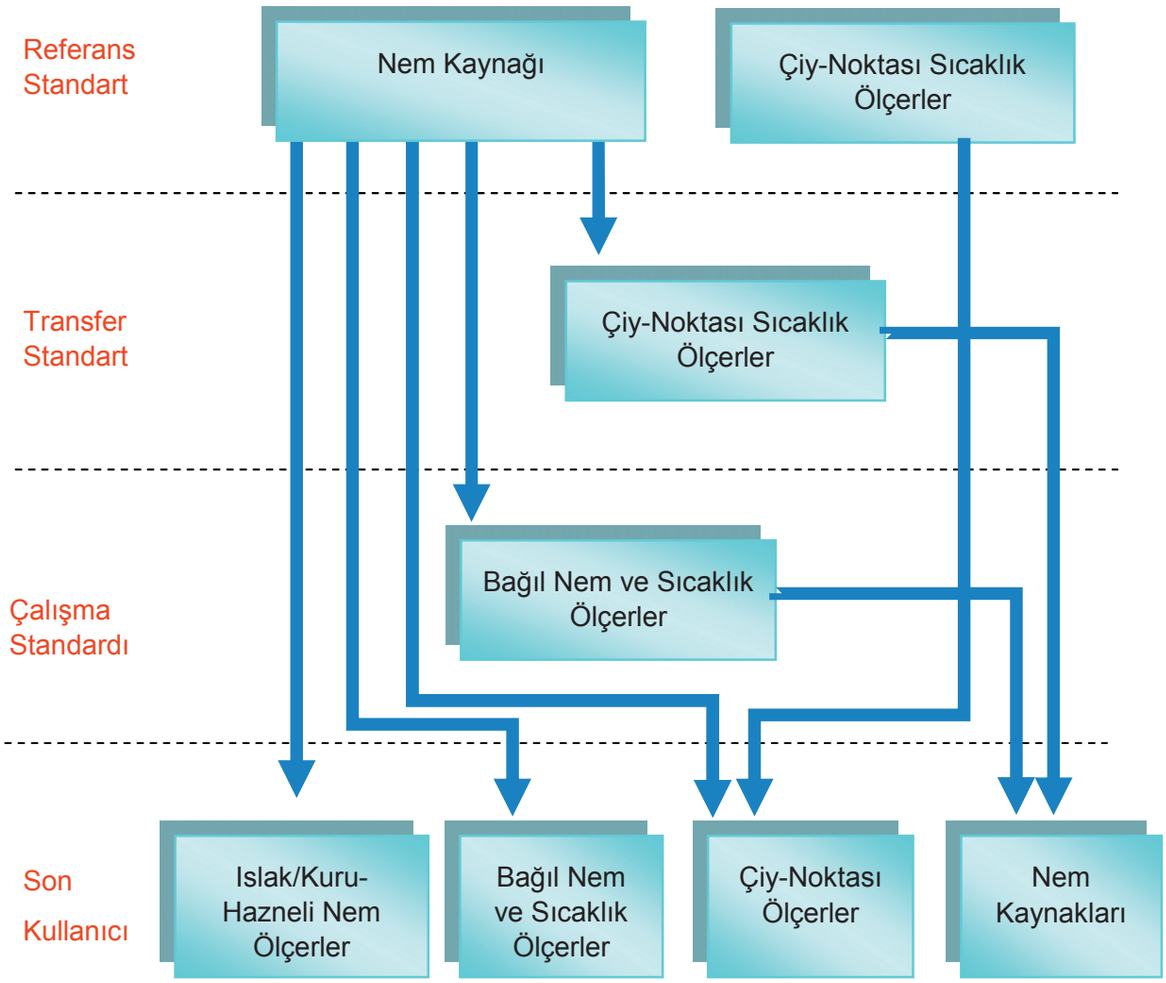
Ölçümler, suyun saflığına, fitilin temizliğine, pervane hızına, radyasyon etkilerine, sıcaklık sensörünün doğruluğuna ve gazın yoğunluk, akışkanlık ve ısıl iletkenliğine bağlıdır. Pratik kullanımda doğru sonuç elde etmek için birçok uyarıya (bakımının yapılması, korunması hakkında) uyulmalıdır. Bu cihazlar sıcaklık ölçümünde oldukça kısıtlı çalışma aralığına (0 °C...+90 °C) sahip olmasına rağmen pratik kullanım için bağıl nem aralığı yeterlidir.

Ayrıca bu cihazlar yüksek sıcaklıklara ve yoğunlaşmaya dayanıklıdır. Orta düzeyde doğruluğa sahiptir. Müşterilerin bu cihazları kullanarak nem ölçen cihazlarını kalibre etmelerinin nedeni düşük maliyetli olmasıdır. Belirsizliği % 2 rh ile % 5 rh aralığında değişmektedir.

Nem Ölçerlerin İzlenebilirlik Zinciri

Herhangi bir ölçüm esnasında elde edilen sonuçların ulusal veya uluslararası standartlarla oluşan bir zincir içerisinde bağlantılı olması izlenebilirlik olarak tanımlanabilir.

Nem ölçümlerindeki izlenebilirlik zinciri Şekil 165'de verilmiştir.



Şekil 165. Nem ölçer izlenebilirlik zinciri

7.4. ELEKTRİK VE MANYETİZMA ÖLÇÜMLERİ

7.4.1 AKIM

7.4.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

19. yüzyıldan önce elektrik ve manyetik olaylarda ilgili tüm tanımlamalar neredeyse nitelikseldi [108][109]. Benjamin Franklin ve A. Volta gibi araştırmacıların kullandığı cihazlar ölçmekten çok olayı gösteren ya da izleyenleri etkilemek için tasarlanmıştı. Bugün potansiyel fark olarak adlandırdığımız büyüklük ile ilgili referanslar ses, şok ya da kıvılcımlar oluşturan cihazlardı. Elektrik pillerinin testleri ve karşılaştırmaları + ve – elektrotların dilimizi değdirdiğimizde algıladığımız tada göre yapılırdı. Elektrik akımları bir telden aktığında telin ısınması sonucu ortaya çıkan rengin kırmızılığına göre derecelendirilirdi [108][109].

19. yüzyılın ortalarında dahi, telgraf icat edildiği dönemde potansiyel farkları pil bataryalarının sayısıyla ve direnç ise "standart" tel olarak adlandırılan telin bir uzunluk birimi olan mil cinsinden miktarı ile tanımlanırdı. İngiltere'de standart #16 bakır tel iken, Almanya'da #8 bakır teldi ve bağımsız araştırmacılar kendilerine özgü birimler ile çalışırlardı.

Tanımlamadaki bu farklılık uluslararası bilim ve ticarette olumsuzluklar ve kargaşa yaratmaktaydı. Bu nedenle ilerleme adına değişik derme çatma birimlerin yerini, teori ve uygulamalar göz önünde tutularak oluşturulan evrensel birimler aldı.

Manyetizma çalışmalarında kullanılan tüm elektromanyetik büyüklükler üç temel büyüklük birimi, uzunluk, kütle ve zaman cinsinden türetilen birimler ile ilk kez ifade eden F. Gauss'tur (1833). Gauss ve bu alandaki takipçisi W. Weber tarafından seçilen temel birimler milimetre, miligram ve saniye idi. W. Thomson (Lord Kelvin) ve J. Clark Maxwell'in liderliğindeki İngiliz bilim adamları Gauss-Weber metodolojisini benimsediler ancak temel birimler olarak santimetre, gram ve saniye olarak seçtiler. Böylece CGS sistemi 1860 yılında ortaya çıktı.

Elektromanyetik büyüklükler için CGS birimleri biri elektrostatik (es) diğeri elektromanyetik (em) olarak adlandırılan iki yaklaşım ile elde edildi. Her iki durumda da her biri sadece bir yeni büyüklük içeren denklemler yazılıyor, diğer büyüklükler takip eden eşitlikler ile elde ediliyordu.

Elektrostatik yaklaşımda ilk eşitlik elektrik yükleri için Coulomb eşitliği idi:

$$F = k\frac{Q_1 \times Q_2}{r^2} \qquad (35)$$

Eşitlik (35)'de k, 1'e eşit boyutsuz bir büyüklük olarak alınmıştır.

Elektromanyetik yaklaşımda ise ilk eşitlik Amper yasası idi:

$$\frac{F}{L} = \gamma\frac{I_1 \times I_2}{d} \qquad (36)$$

Bu eşitlik, birbirleri arasındaki mesafe d olan iki paralel akım I_1 ve I_2 arasındaki birim uzunluk başına kuvveti ifade eder. γ katsayısı boyutsuz ve 1'e eşit seçilir. Yukarıdaki formül ile elektrik akımı birimi, aralarındaki mesafe (d) 1 santimetre olduğunda aynı büyüklükteki diğer akımın üzerine santimetre başına 1 dyne kuvvet uygulayan akım olarak tanımlandı. Fransız bilim adamı Biot'un anısına bu birime biot adı verildi. 1 biot'un elektrostatik akımdan 3×10^{10} kat büyük olduğu bulundu. Bu bulgu çok önemliydi. Çünkü 3×10^{10} ışığın cm/s cinsinden hızıdır. Işık hızının (c) manyetik bağıntılarda ortaya çıkışı 1873 yılında elektromanyetik dalgalar teorisini geliştiren Maxwell ve daha sonrada görelilik teorisini geliştiren Einstein için önemli bir ipucu oldu.

Elektrik mühendislerinin uygulamadaki ihtiyaçlarını karşılamak için Ohm, Amper ve Volt olarak adlandırılan, ilişkili oldukları elektromanyetik birimler ile çarpımları olarak ifade edilen birimler ortaya kondu. Ancak bu birimlerin gerçekleştirilmesi için yapılmış olan prototipler, temsil ettiği değerden biraz farklıydı. Bunun sonucunda prototipler, bu birimlerin tanımları halini aldı.

Elektrik akımının uygulamadaki birimi bir gümüş nitrat eriyiğinden 1 saniyede 1118 mg gümüş ayırabilen sabit akım şiddeti olarak tanımlanmış ve tahminen akımın em biriminin 1/10'nuna eşit olduğu kabul edilmiştir. Bu tanım 1893 yılında Chicago'da toplanan Uluslararası Elektrik Kongresi ve daha sonra da 1908 yılında Londra'daki bir konferansta yasal tanım halini almıştır.

19. yüzyılın sonunda uluslararası Ohm ve uluslararası Amper yasal olarak tanımlandı ve yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Volt ve Farad gibi diğer uygulama birimleri Ohm, Amper, Santimetre, Gram ve Saniye cinsinden tanımlandılar. Ancak CGS sistemleri olan em ve es arasındaki uyumsuzluklar, uygulama birimleri ile mutlak birimler arasında küçük farklara sebep oluyordu. Örneğin elektrostatik'te elektrik akımının boyutu $g^{1/2}$ $cm^{3/2}$ s^{-2} olduğu halde, elektromanyetikte $g^{1/2}$ $cm^{1/2}$ s^{-1} oluyordu. Uyumsuzluğun ortadan kaldırılmasına yönelik çalışmalar, günümüzde kullandığımız SI sistemine giden gelişmelere neden oldu.

SI sistemimin tarihi İngiliz bilim adamı O. Heaviside'ın 1892'deki ve İtalyan elektrik mühendisi G. Giorgi'nin 1902'deki birbirlerinden bağımsız çalışmaları ile başlar. Heaviside, Eşitlik (35) ve (36)'dan türetilen formüllerde, ortaya çıkan 4 π çarpanının, k ve γ ¼ π'ye eşit olduğunda ortadan kalktığını gözledi. Küresel simetriye sahip problemlerde 4 π, eksenel problemlerde 2 π olacak şekilde bir düzenleme yaparak bu işleme rasyonelleştirme adını verdi. Giorgi ise yeni tanımlanmış birimlerde rasyonelleştirmeyi uyguladı.

1930'lardaki teknolojik ilerleme, özellikle elektrik terazilerindeki gibi, etkileşen bobinler kullanıldığında teller arasındaki elektrik kuvvetleri ölçmek için daha iyi yöntemler geliştirilmesini sağladı ve amperin elektrokimyasal tanımı terk edildi. Günümüzde Amperin SI tanımı elektrodinamik olarak yapılmaktadır.

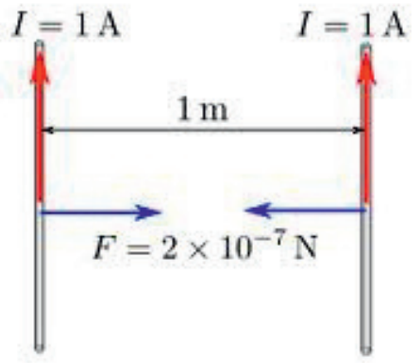
Giorgi üç temel birimin metre, kilogram ve saniye ile değiştirilmesi durumunda 1 Joule'ün 10^7 erg'e eşit olup tüm alanlarda enerji ve işin doğal birimi haline geleceğini fark etti. Jolue aslında bir CGS birimi değildi ve 1882'de W. Siemens tarafından üzerinden 1 amper akım akan 1 ohm dirençte 1 saniyede ortaya çıkan ısı miktarının birimi olarak tanımlamıştı. 1889'da Watt'ın, yapılan elektriksel işin miktarı olduğu kabul edilmişti. Bu değişiklik sonucunda Ohm, Amper ve Volt yeni sistemin doğal birimleri oldular.

Giorgi CGS sistemi yerine geçecek yeni bir sistem önerdi. Bu yeni sistem dört temel birime dayalı idi; metre, kilogram, saniye ve bir elektriksel birim. 1930'da Uluslararası Elektrik Komisyonu (IEC) dördüncü temel birimin amper olması şartıyla bu öneriyi kabul etti. Giorgi sistemi MKSA olarak tanındı ve 1940'da etkin olarak kullanılmaya başlandı. II. Dünya savaşını araya girmesi ile uygulamalar aksadı, ancak 1954'te 10. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda MKSA sistemi resmen kabul edildi. Rasyonelleşmiş biçimi 1960'da şu an kullandığımız SI sisteminin bir parçası oldu.

Temel SI birimi Amper,

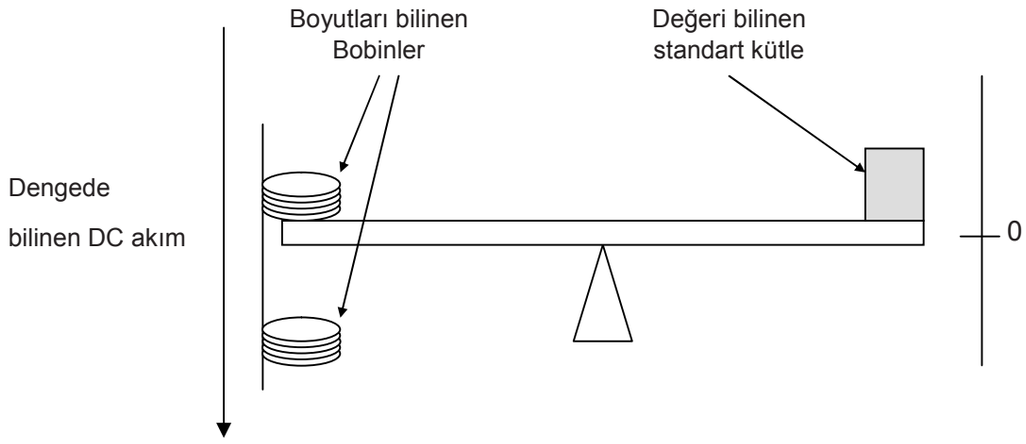
> Vakum ortam içinde, birbirinden 1 m uzakta, ihmal edilebilir kesitli, sonsuz uzunluktaki iki paralel iletkenden, aralarında 2×10^{-7} Newton/m kuvvet oluşması durumunda geçen sabit akım.

olarak tanımlandı [2]. Bu şekilde, türetilmiş SI birimleri, amper üzerinden ilişkilendirildi (Şekil 166).



Şekil 166. SI Amper biriminin tanımı

Amper'in tanımına uygun olarak elde edilmesinin güç oluşunun yanı sıra, mekanik birimlere bağlı oluşu, elde edilen belirsizlik değerinin 15×10^{-6}'lar mertebesinde olmasına sebep olmaktadır. Yüksek belirsizlik değerinin yanı sıra, Amper tanımı ile ancak en fazla birkaç dakika için sağlanabilmektedir. Şekil 167'de Amperin tanımına uygun gerçekleştirilmede kullanılan sistem gösterilmektedir.



Şekil 167. Mekanik birimler üzerinden elektriksel temel birim olan Amper'in elde edilişi

Terazinin solunda yer alan bobinlerdeki manyetik alan, akım ve sarım sayısı ile orantılı bir çekici kuvvet oluşturur. Oluşan kuvvet, terazinin diğer kolundaki kütle ile dengelenir. Kütle değeri kullanılarak iletken telden geçen akım değeri belirlenir.

Amper SI temel birimi olmasına rağmen, elde edilişindeki güçlük ve yüksek belirsizlik değerinden dolayı bugün pek çok ulusal metroloji enstitüsünde tanımına uygun olarak elde edilmemektedir. Bunun yerine Ohm yasasına uygun olarak Josephson Gerilim Standardı ile elde edilebilen yüksek doğruluktaki gerilim ve Quantum Hall sistemi ile sağlanan direncin oranı (I=V/R) alınarak, Planck sabiti (h) ve elemanter yüke (e) bağlı elde edilir.

Ekim 2011'de gerçekleştirilen Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM) alınan bir kararla, 1889'dan beri uluslararası kilogram prototipi ile tanımlanan kilogram biriminin tanımının güncellenerek, kuantum standartları vasıtasıyla (Watt Balance) temsil edilmesi ve bunun sonucu olarak (h) Planck sabitinin cinsinden tanımlanmasına karar verildi. Kilogramın bu şekilde

yeniden tanımlanması Amper'in tanımının da güncellenmesini gerektirdi. Amper'in 2014'ten sonra uygulamaya geçirilmesi öngörülen yeni SI tanımı şu şekilde yapıldı [2][110]

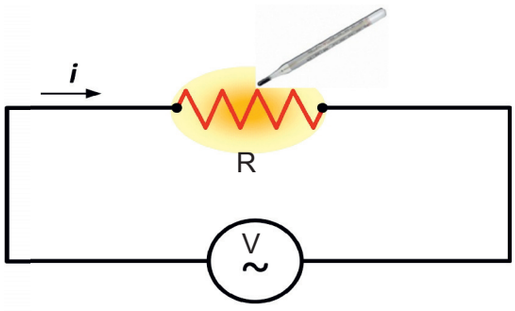
> Amper, A, elektrik akımı birimidir; Büyüklüğü, elemanter yükün sayısal değerinin, s A birimleri ile (Coulomb, C) ifade edildiğinde, tam olarak $1{,}60217\times10^{-19}$ değerine eşit olacak şekilde sabitlenerek ayarlanır.

Amper tanımı sadece sabit, DC akımlar için uygulanabilirdir. Oysa AC akımda genlik ve polarite zamanla değişmektedir. Bu sebeple, AC akım büyüklüğünün izlenebilirliği, DC akım ile ilişkilendirilmek üzere sağlanır. AC büyüklüklerin tanımlamalarında kullanılan en önemli parametre efektif değer (Root Mean Square-RMS), doğrudan sinyalin gücüyle ilişkilidir. Bir Q(t) AC sinyalin RMS değeri, bir direnç üzerinde bu sinyalin oluşturduğu güç ile aynı gücü oluşturan DC sinyalin değerine eşittir. Matematiksel tanımı ise Eşitlik (37)'de verilmektedir.

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\lim_{T\to 0}\frac{1}{T}\int_0^T Q^2(t)\,dt} \qquad (37)$$

RMS, sinyalin gücünü yansıttığı için, güç karşılaştırılması yoluyla AC akım DC akım ile ilişkilendirilmesinde kullanılabilecek en uygun parametredir. Günümüzde en yüksek doğrulukta AC akım ölçümü, DC akım ile karşılaştırılmak suretiyle gerçekleştirilir.

Joule kanununa göre, direnç üzerinde ortaya çıkan ısı miktarı, uygulanan AC veya DC akımın RMS değerinin karesi ile orantılıdır. Uygun bir sezicinin kullanılması ile AC ve DC akımların oluşturduğu ısıyı ve dolayısıyla yükselen sıcaklığı ölçmek ve DC ve AC akımları karşılaştırmak mümkündür.



Şekil 168. RMS değerleri eşit olan AC ve DC akım, aynı direnç üzerinde aynı ısıyı oluşturur

7.4.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

DC Akım

DC akım izlenebilirliğinin Ohm yasasına uygun olarak Josephson Gerilim Standardı ile elde edilebilen yüksek doğruluktaki gerilim ve Quantum Hall sistemi ile sağlanan direncin oranı (I=V/R) alınarak, Planck sabiti (*h*) ve elemanter yüke (*e*) bağlı elde edildiğinden bahsedilmişti.

DC akım ölçümlerinde kullanılan direnç, üzerinden geçebilecek akım değerleri için direnç değeri belirlenmiş pasif bir direnç elemanı olup, DC akım şöntü olarak adlandırılır.

Akım şöntleri genellikle sahip oldukları direncin değeriyle değil, optimum akım değerleri ile tanımlanırlar. Örneğin 10 A DC akım şöntü gibi. DC akım şöntü izlenebilirliği Kuantum Hall Direnç Standardına izlenebilir referans direnç standartları üzerinden sağlanır. Kalibratörlerin ve DC akım ölçerlerin DC akım fonksiyonlarının kalibrasyonunda kullanılırlar. DC direnç standardı olan DC akım şöntüne dair ayrıntılı bilgi Direnç bölümünde verilmektedir.

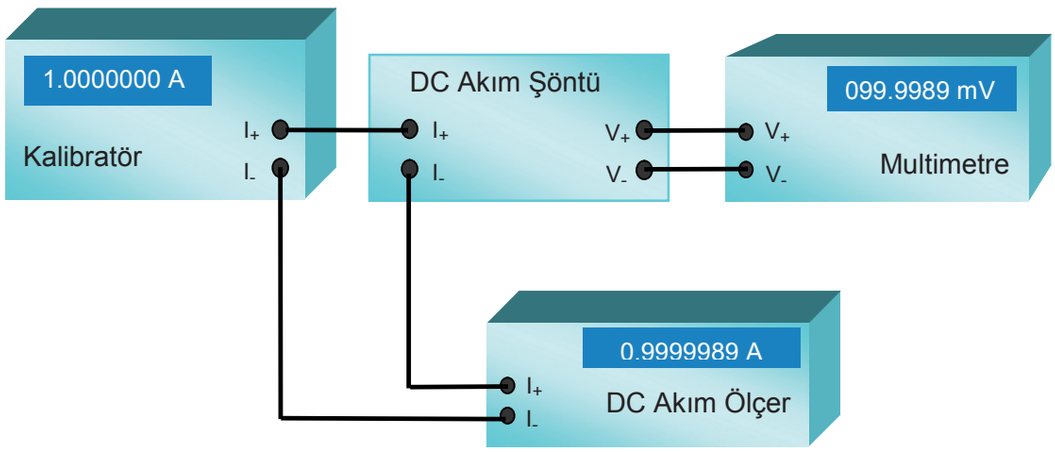


Şekil 169. DC Akım şöntü ile DC akım kaynağı kalibrasyonu

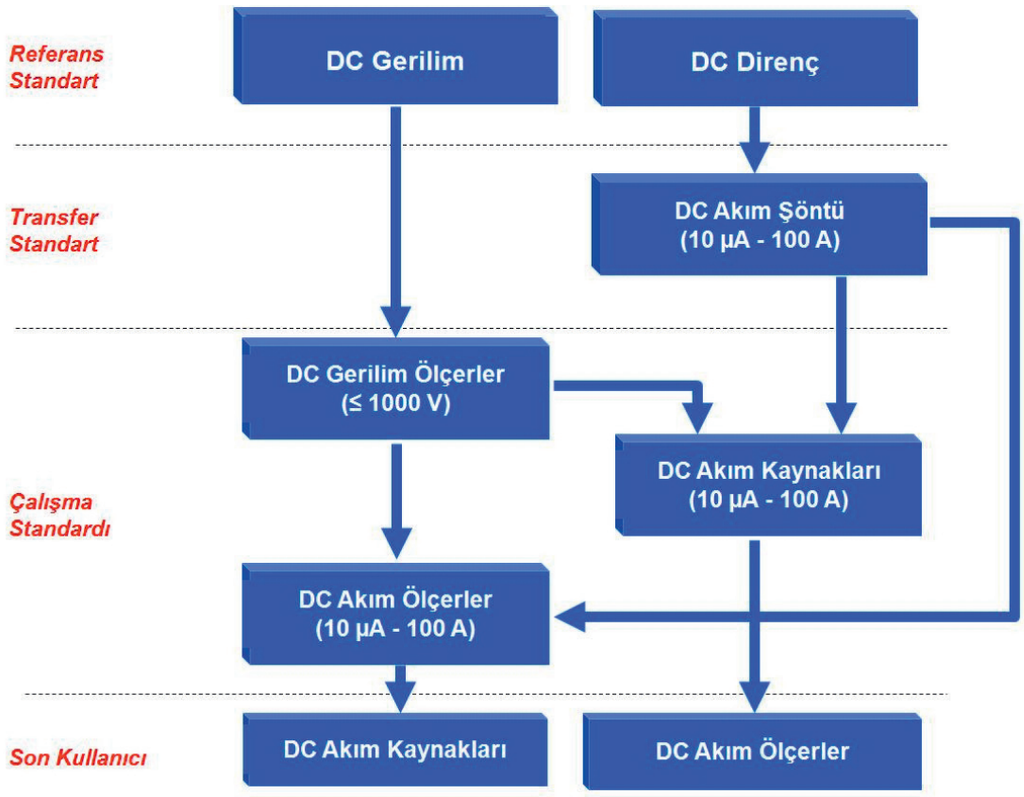
Şekil 169'da DC akım kaynağı kalibrasyonu için ölçüm sistemi verilmektedir. DC akım kaynağı çıkış terminalleri, direnç değeri bilinen ($R_{şönt}$) DC akım şöntünün akım uçlarına bağlanır. Kaynaktan şönte akım uygulanarak, şöntün gerilim terminallerine bağlı olan multimetre ile şönt üzerinde oluşan DC gerilim (V_{DMM}) ölçülür ve kaynaktan uygulanan akım değeri (I) Eşitlik (38) kullanılarak hesaplanır.

$$I = \frac{V_{DMM}}{R_{şönt}} \tag{38}$$

DC akım şöntü ile DC akım ölçer kalibrasyonu ise, şönte seri bağlanan DC akım ölçere uygulanan DC akım değerinin yukarıda anlatılan yöntemle belirlenmesi ve DC akım ölçerin göstergesindeki değer ile karşılaştırması suretiyle gerçekleştirilir (Şekil 170).



Şekil 170. DC akım şöntü kullanılarak multimetrenin "DC akım" fonksiyonu kalibrasyonu



Şekil 171. DC akım izlenebilirliği

AC Akım

AC ölçümlerde kullanılan cihazlar, çalışma prensiplerine bağlı olarak doğruluk bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. Genel olarak AC ölçüm cihazları kullanılan ölçüm tekniğine bağlı olarak üç kategoride toplanabilir.

1) AC büyüklüğün çeşitli anahtarlama ve dijital-analog çevirme tekniklerini kullanarak doğrudan bilinen bir DC büyüklük seviyesinden elde eden cihazlar.

Bu tip cihazlar özellikle düşük frekanslarda (< 30 Hz), diğer tekniklere dayalı çalışan cihazlardan daha doğru ölçüm olanağı sağlarlar (< 1×10^{-6}).

2) Analiz Tekniğine dayanan "tepe değeri" ölçen cihazlar ve "sample and hold" tekniği ile ölçüm yapan cihazlar.

Bu tip cihazlar düşük frekanslarda (< 20 kHz), 10×10^{-6} değerinin altında belirsizliklerle çalışırlar.

3) AC büyüklüğün rms değerini ısıl çeviriciler kullanarak, bilinen bir DC büyüklük ile karşılaştırarak ölçen cihazlar.

Bu tip cihazlar geniş bir frekans bandında (< 1 MHz), $0{,}5\times10^{-6}$ değerine kadar düşen belirsizliklerle çalışırlar.

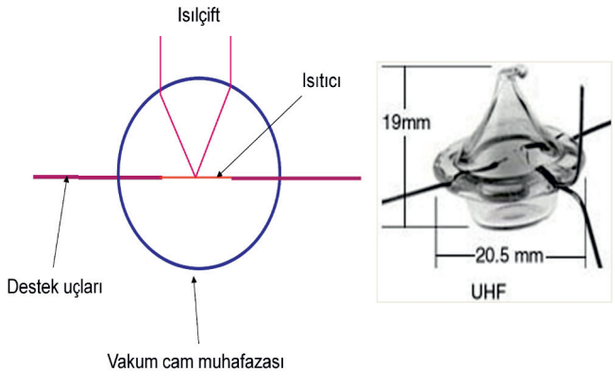
İlk iki kategorideki cihazlar, çeşitli sayısal akım kaynağı ve multimetre olarak sıkça karşımıza çıkarken, Isıl Çeviriciler olarak adlandırılan üçüncü kategorideki cihazlar, geniş bir frekans bandında oldukça düşük belirsizlik değerleriyle çalışıyor olduklarından primer seviyede standart olarak kullanılırlar. Isıl çeviriciler, AC-DC Transfer Standardı olarak da adlandırılırlar.

Isıl çevirici, AC ölçümlerde ilk olarak Hermach [111] tarafından bulunarak kullanılmıştır. Daha sonra pek çok bilim adamı tarafından yaygın olarak üzerine çalışılmış ve geliştirilmiştir [112][113][114]. Günümüzde, tek eklemli ısıl çeviricinin yanı sıra, çok eklemli ısıl çevirici, elektronik ısıl çevirici, kuartz ısıl çevirici gibi çeşitli türleri bulunmaktadır. Isıl çeviriciler ses frekanslarında (20 Hz - 20 kHz) 1×10^{-6} mertebesinde belirsizliğe sahip olup metroloji enstitülerinde birincil seviye AC gerilim ve akım standartları olarak kullanılır.

Isıl çeviriciler bünyelerindeki direnç üzerinde oluşan sıcaklığı algılamakta kullanılan sensörler açısından, ısılçift ve elektronik yapılı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sensör olarak ısılçift kullanan ısıl çeviriciler ise yapılarındaki ısılçift sayısına göre ikiye ayrılırlar; Çok-Eklemli Isıl Çeviriciler ve Tek-Eklemli Isıl Çeviriciler.

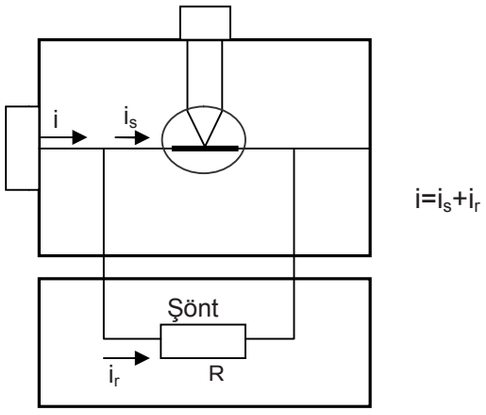
Tek-Eklemli Isıl Çeviriciler

Yüksek doğruluklu AC ölçümlerde en yaygın kullanılan bu çeviricinin yapısında, isminden de anlaşılacağı üzere, tek bir ısılçift bulundurur. Tek-Eklemli Isıl Çeviriciler, ince, düz, akıma karşı yüksek hassasiyete sahip bir tel ve üzerine yerleştirilmiş ancak elektriksel olarak izoleli bir ısıl-çiftten oluşur. Bu yapı cam bir vakum ortamına Şekil 172'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 172. Isıl-çift yapılı bir Isıl Çevirici

Tek eklemli ısıl çeviricinin genelde, ısıtıcı direncin değeri 100 Ω, bu direnç üzerinden geçen nominal akım değeri ise 5 mA civarında olduğundan uygulanabilecek giriş gerilim değeri 0,5 V ile sınırlıdır. Bu sebeple yüksek akım değerleri için ısıl çeviriciye şönt olarak adlandırılan paralel bir direnç bağlanmaktadır (Şekil 173).



Şekil 173. Isıl Çevirici-Şönt

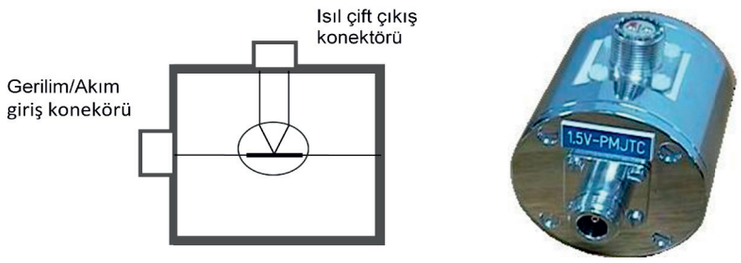
AC akım için kullanılan şöntler özel tasarım olup, genel olarak indüktif etkisi minimum seviyede olan metal-folyo dirençlerden yapılır. Direnç değeri beraberinde kullanıldığı ısıl çevirici parametrelerine uygun olarak hesaplanır.

Örneğin, ısıl çevirici direnci 100 Ω ve nominal gerilim/akım değerleri 0,5 V / 5 mA ve ölçülmek istenen akım 1 A ise, şönt üzerinde geçmesi gereken akım 995 mA, buna göre de şöntün direnç değeri;

$$R = \frac{0{,}5\ \mathrm{V}}{995\ \mathrm{mA}} = 0{,}503\ \ \Omega$$

olarak belirlenir.

Tek-Eklemli Isıl Çevirici, dış ortamdan kaynaklanan etkileri (EM dalgalar, sıcaklık değişimi vb.) ortadan kaldırmak içini, tercihen nikel kaplı çelikten oluşan bir gövde içine yerleştirilir (Şekil 174).



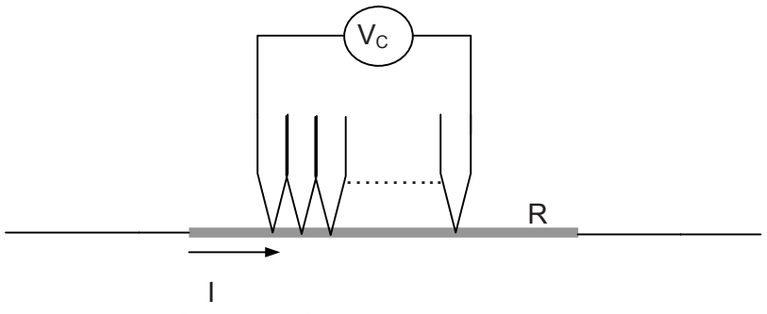
Şekil 174. Muhafazalanmış Isıl Çevirici

Bu cihazların önemli bir dezavantajı, termal element içerisindeki direncin akım değişimine aşırı hassasiyeti sebebiyle, ısıl çevirici girişine uygulanacak akımın kısa bir süre için dahi olsa nominal gerilim değerini aşmasının cihaza zarar vermesidir.

Yapılan araştırmalar sonucunda, tek-eklemli ısıl çeviricilerde transfer farkının ortaya çıkmasına sebep olan en önemli etkilerin, özellikle audio frekanslarda Thomson ve Peltier etkileri, daha yüksek frekanslarda ise skin etkisi ve dielektrik kayıplar oldukları görülmüştür.

Çok-Eklemli Isıl Çeviriciler

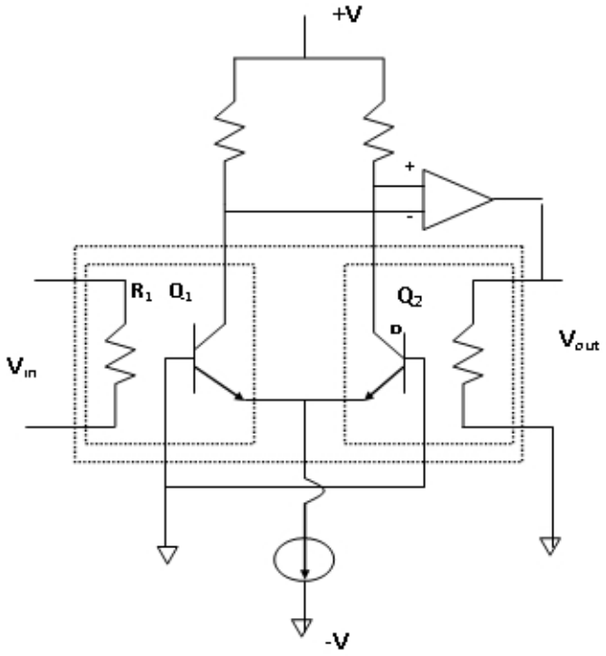
Tek-Eklemli Isıl Çeviricilerden farklı olarak Şekil 175'de görüldüğü gibi termal-elementte birbirine seri bağlı birden fazla ısılçift bulunur. Bu nedenle her bir ısılçift çıkışının toplamı olan çıkış gerilimleri, tek-eklemli ısıl çeviriciye oranla daha yüksektir. Ayrıca özellikle audio frekanslarda tek-eklemli ısıl çeviricilerin transfer fark değerlerini etkileyen Thomson ve Peltier etkileri önemli derecede giderilmiştir. Dolayısıyla bu frekans bandında transfer fark değerlerinin sıfıra çok yakın oldukları teorik ve deneysel olarak belirlenmiştir [112][113][114]. Sahip olduğu avantajlardan dolayı bugün AC Metrolojide 1 MHz'e kadar primer seviyede transfer standardı olarak kabul görür.



Şekil 175. Çok eklemli ısıl çevirici

Elektronik Yapılı Isıl Çeviriciler

Tek-eklemli ısıl çeviricilerin (single-junction thermal converter/SJTC) ve çok-eklemli ısıl çeviricilerin (multi-junction thermal converter/MJTC) ortam sıcaklığına karşı hassasiyetleri, 250 mV rms değerinin altındaki gerilimler için ölçüm yapamamaları ve düşük gerilim çıkışları gibi dezavantajları ölçümleri zorlaştırmaktadır. Son zamanlarda yaygın olarak kullanılan elektronik yapılı transfer standartları, yapılarında elektronik "RMS sensör" tümleşik devresi bulundurmakta ve yüksek çıkış gerilimine, hızlı “settling” özelliğine ve güçlü koruma ünitesine sahiptirler.



Şekil 176. Elektronik yapılı ısıl çevirici

Şekil 176’da görüldüğü gibi iki termal çeviriciden oluşur. Direnç üzerinde harcanan güç, diğer standartlardan farklı olarak ısılçift tarafından değil, bir transistörün baz-emitör eklemi tarafından algılanır. Geri besleme devresi ile V_{out} uçlarında bir DC gerilim oluşturulur. Böylece bütün ısıl çeviricilerde kullanılan ve bir direncin, girişlerine uygulanan gerilimle orantılı olarak üzerinde oluşacak sıcaklığın algılanmasına dayalı ölçüm yöntemi, elektronik rms sensör kullanılarak gerçekleştirilmiş olmaktadır.

AC-DC Transfer Farkı

Teorik olarak aynı etkinlikteki DC ve AC giriş büyüklüklerine karşın, ısıl çevirici çıkışlarının aynı olması beklenir. Pratikte bu durum farklı olup, ısıl çevirici çıkışında aynı değeri verecek olan, AC ve DC giriş büyüklükleri arasında AC-DC transfer farkı olarak adlandırılan bir fark oluşur. Bağıl olarak ifade edilen bu fark, ısıl çeviriciyi karakterize etmekte kullanılan temel parametredir.

Joule yasasına göre ideal bir direnç üzerine DC akım ya da bu değere eşit AC rms akım değerleri uygulandığında direnç üzerinde oluşacak güç ve bununla orantılı sıcaklık değerlerinin eşit olması beklenir. Ancak bazı etkilerden dolayı bu eşitlik sağlanamamakta ve bir fark değeri oluşmaktadır. Bu fark değeri transfer farkı olarak adlandırılır ve matematiksel olarak aşağıda görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\delta = \frac{I_{ac} - I_{dc}}{I_{dc}}\Big|_{E_{ac}=E_{dc}} \qquad (39)$$

δ : AC-DC transfer farkı [A/A]

I_{ac} : Isıl çevirici girişine uygulanan AC akımın rms değeri [A]

I_{dc} : Isıl çevirici çıkışında AC ile aynı değeri verecek biçimde ayarlanmış (+) ve (-) polaritedeki DC akım giriş değerlerinin ortalaması [A]

E_{ac} : AC akım girişine karşılık ısıl çevirici çıkış gerilimi [V]

E_{dc} : DC akım girişine karşılık ısıl çevirici çıkış gerilimi [V]

Bu parametre genel olarak 10^{-6} mertebesine olup ısıl çevirici sertifikalarında kullanıldığı her akım-frekans noktası için beyan edilir. Tablo 16'da bir akım ısıl çeviricinin AC-DC transfer farkları gösterilmiştir.

Tablo 16. Örnek ısıl çevirici AC-DC transfer fark tablosu

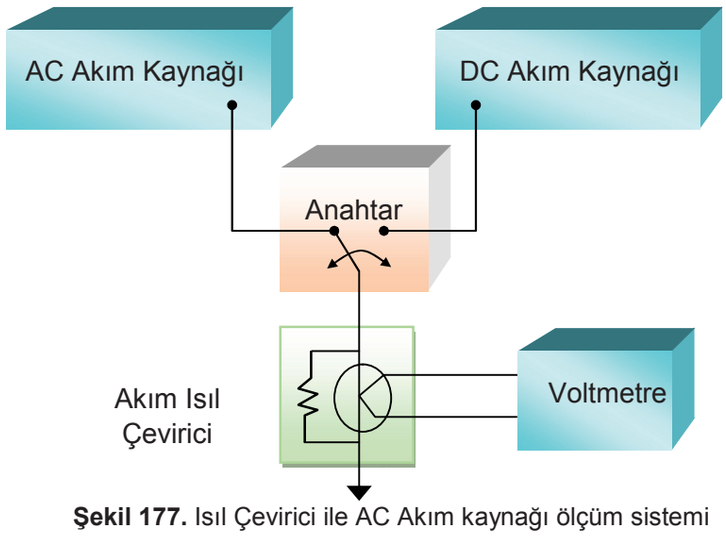
Akım / Frekans	AC-DC Transfer Farkı (µA/A)						
	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz
1 A	-10	-3	1	1	13	31	62

Pozitif AC-DC transfer farkı, ısıl çevirici üzerinde aynı çıkışı elde edilmesi için uygulanan AC akımın DC akımdan daha büyük olduğu anlamına gelir. Örneğin AC-DC transfer farkları Tablo 16'da verilen ısıl çevirici için, ısıl çeviriciye uygulanan 50 kHz frekans değerinde bir AC akım aynı çıkışı veren DC akım değerinden 31 µA/A daha yüksektir.

Bir ısıl akım çevirici, nominal akım değerinin % (50 – 100) aralığında bir çalışma bölgesine sahip olup, transfer fark değerleri, frekans aynı kalmak suretiyle, bu aralıktaki her akım değeri için aynıdır. Örneğin 1 A bir akım ısıl çevirici 500 mA ile 1 A aralığında herhangi bir akım değerinde kullanılabilir. Isıl akım çeviricilerin frekans çalışma aralığı genelde, 10 Hz – 100 kHz'dir.

Isıl çeviriler kullanılarak gerçekleştirilen, AC büyüklüğün DC büyüklük ile ilişkilendirilmesi ölçümleri AC-DC transfer ölçümleri olarak adlandırılır.

Ölçüm sisteminin temelini, AC-DC transfer farkı bilinen bir ısıl çevirici, değeri bilinen bir DC akım kaynağı ve ısıl çeviricinin çıkış gerilimini ölçmede kullanılan voltmetre oluşturur. Şekil 177'de bir AC akım kaynağı kalibrasyonu için ölçüm sistemi verilmektedir.



Şekil 177. Isıl Çevirici ile AC Akım kaynağı ölçüm sistemi

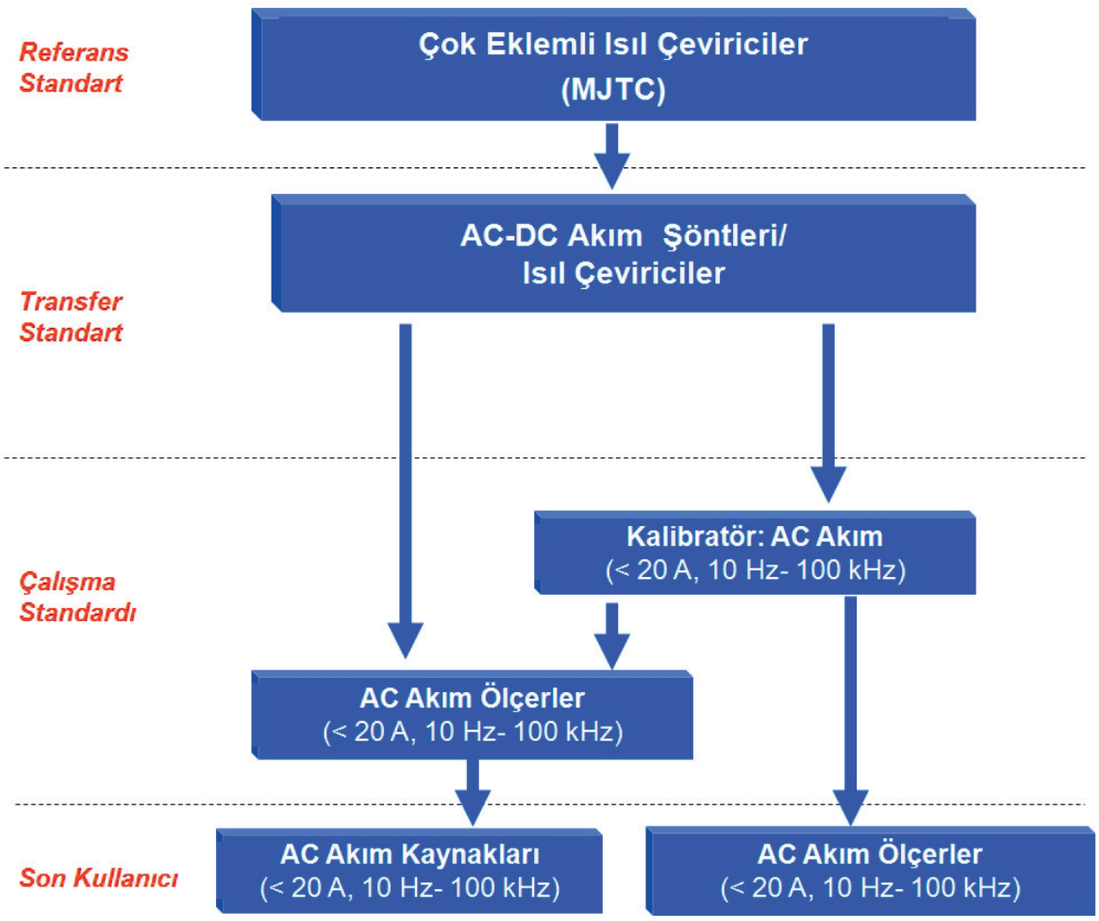
Basitçe bir AC akım kaynağının kalibrasyonu, anahtarın konumunu AC kaynağı konumuna alınarak ısıl çeviriciye test edilen AC akımının uygulanması ile başlar. Isıl çevirici çıkışındaki gerilim kararlı hale geldiğinde, voltmetre ile ölçülen DC gerilim değeri kaydedilir. Anahtar hızlı bir şekilde DC konumuna alınarak, voltmetre üzerinde daha önce kaydedilen DC gerilim değeri görülene kadar, referans DC akım kaynağı çıkışı ayarlanır ve değeri kaydedilir. DC akımın polaritesi değiştirerek prosedür tekrarlanır. Her iki polaritedeki DC akımın mutlak ortalaması alınır ve AC akımın değeri Eşitlik (40) kullanılarak hesaplanır:

$$I_{AC}=I_{DC}\times(1+\delta) \qquad (40)$$

I_{AC} : Kalibre edilen AC kaynaktan uygulanan gerçek AC akım değeri

I_{DC} : Değeri bilinen DC akım

$\delta_{AC\text{-}DC}$: Transfer standardına ait AC-DC transfer farkı



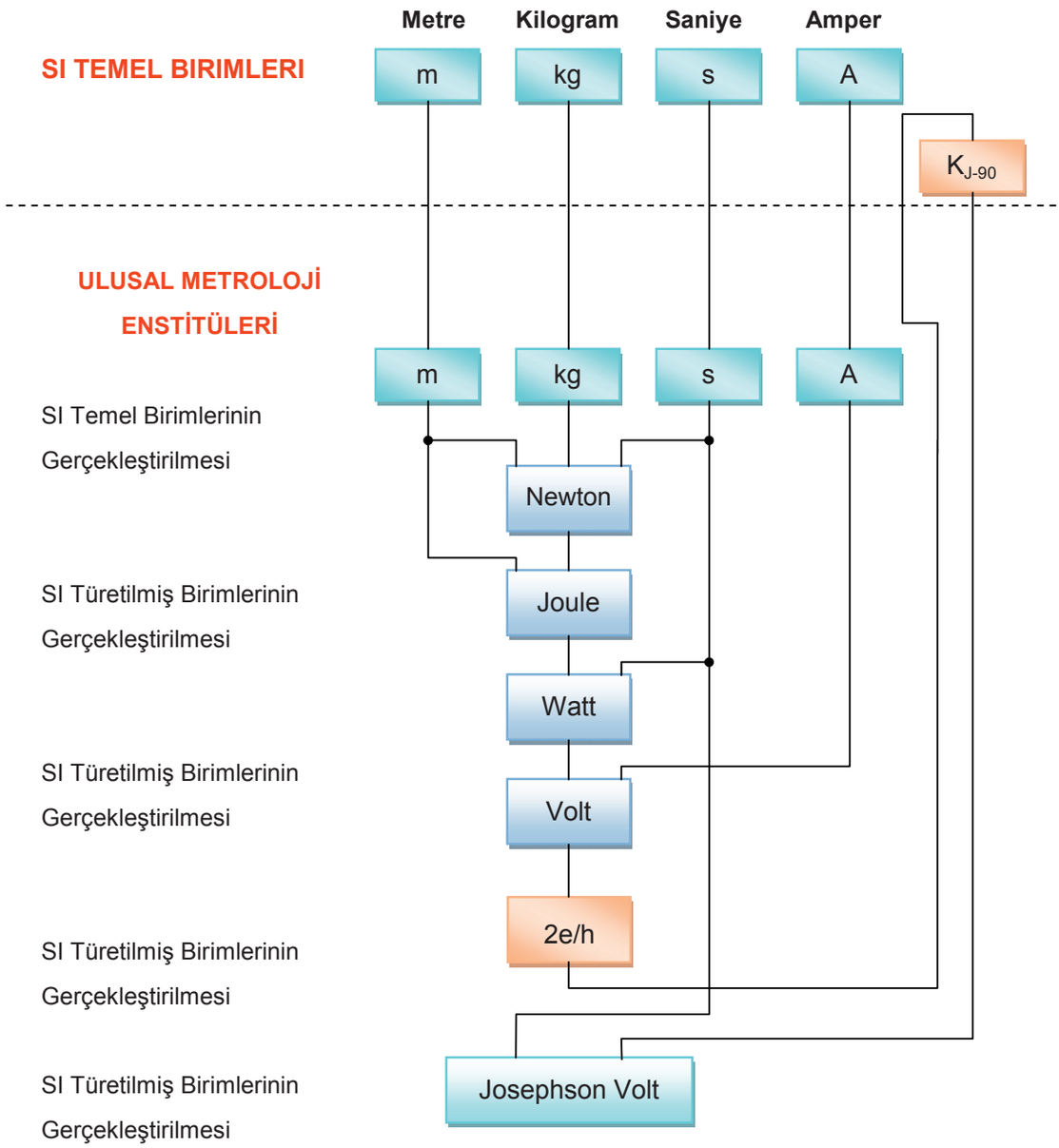
Şekil 178. AC akım izlenebilirliği

7.4.2 GERİLİM

7.4.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Gerilim ölçümleri, endüstri, savunma sanayi, sağlık sektörü, araştırma-geliştirme faaliyetleri gibi geniş bir alanda oldukça önemli bir uygulama alanına sahiptir. Bununla birlikte elektriksel olmayan ölçüm büyüklükleri de gerilime çevrilmek suretiyle ölçülmekte, işlenmekte ve kayıt edilmektedir.

SI türetilmiş birimlerinden olan Volt, Şekil 179'da gösterildiği gibi, Amper ve mekaniksel birim olan Watt birimleri üzerinden elde edilir.



Şekil 179. Volt'un SI birimlerinde elde edilmesi

Volt, türetilmiş SI birimi olarak CIPM toplantısında (1946, Resolution 2; PV, 20, 132-133);

> 1 Amper akım taşıyan bir iletkenin iki nokta arasındaki harcanan güç 1 Watt olduğunda bu iki nokta arasındaki elektromotor kuvveti

olarak tanımlanır [2]. Bu tanıma göre Volt Eşitlik (41) ile ifade edillir.

$$V = \frac{W}{A} \tag{41}$$

Eşitlikte W, watt birimi cinsinden gücü, A ise amper birimi cinsinden akımı temsil eder.

$$1\ \text{Watt} = 1\ \text{Joule/s} \tag{42}$$

$$1\ \text{Joule} = 1\ \text{N m} \tag{43}$$

$$1\ \text{N} = 1\ \text{kg m/s}^2 \tag{44}$$

olduğu dikkate alınarak, 1 Volt, temel SI birimleri cinsinden Eşitlik (45) ile ifade edilir:

$$1\ \text{V} = 1\ \frac{\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}\ \text{m}}{\frac{\text{s}}{\text{A}}} = 1\ \text{kg}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-3}\text{A}^{-1} \tag{45}$$

Eşitlik (45)'de görüldüğü gibi, türetilmiş bir SI birimi olan Volt'un doğrudan temel SI birimleri cinsinden gerçekleştirmesi, uzunluk, kuvvet ve güç mekanik birimlerine bağlı oluşundan dolayı oldukça güçtür. Ayrıca, Volt'un tanımına uygun olarak gerçekleştirilmesi ile elde edilebilen en iyi belirsizlik olan $0{,}4\times10^{-6}$ değeri bile, gelişen teknolojinin ve bilim dünyasının yüksek kararlılık ve yüksek doğruluk gibi ihtiyaçlarını sağlamada yeterli kalmamaktadır. Bu durum, birimin tanımından farklı yöntemlerle gerçekleştirilmesi zorunluluğunu gündeme getirmiştir [115].

Önceleri Volt, bir grup standart pilin-doymuş Weston pilleri-ortalama emf (elektro motor kuvveti) değeri ile elde edilmişti. Ancak bu ortalama değerin zamanla ve sıcaklık, nem, titreşim gibi ortam şartlarına bağlı olarak değişiminin saptanması ve bu özelliği ile laboratuvarlar arası izlenebilirliği aktarılmasında yaşanan problemler nedeniyle yeni arayışlar başlamıştır. Yarıiletken teknolojisinde yaşanan gelişmelere paralel olarak, gerilim birimi, yapısında bir zener diyot bulunan standartlar kullanılarak gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Ancak, gelişen teknoloji ile daha iyi doğrulukta, kararlı ve tekrarlanabilir standartlara ihtiyaç duyuldu. 1962 yılında Brian Josephson tarafından keşfedilmiş olan AC Josephson etkisi, ölçme biliminde hızla kullanıma alındı. Ancak, bu sistem ilk önceleri uzun yıllar e-elektron yükünün, h-Planck sabitine oranının (e/h) belirlenmesinde kullanıldı [116]. Dünyanın çeşitli yerlerinde bu sistem ile gerçekleştirilen e/h oranı ölçümleri, referans alınan gerilim standartlarının değerleri arasındaki farklardan doğan büyük farklılıklar göstermiştir. Bu durum, sistemin, e/h oranı sabit alınarak, gerilim biriminin gerçekleştirilmesinde kullanılmaya başlanması düşüncesini doğurmuştur.

Josephson etkisi kullanılarak gerçekleştirilen ilk gerilim ölçümlerinde de, ülkeler arasında kabul edilen e/h oranının faklılığından dolayı farklılık gözlendi. Ancak bu sorun, uluslararası metroloji hiyerarşisinin en üst noktasında bulunan organizasyon olan CIPM tarafından 2e/h oranının $K_{J\text{-}90}$ -Josephson sabiti olarak;

$$K_{J\text{-}90} = 483\ 597{,}9\ \text{GHz/V} \tag{46}$$

tanımlanmasıyla ortadan kaldırıldı.

Elektriksel büyüklüklerde uzun süreli kararlılık, yeniden üretilebilirlik ve doğruluk gereksinimleri dikkate alınarak, CIPM'in 1989 yılındaki toplantısında Volt'un Josephson etkisi vasıtasıyla temsil edilmesi kararı alındı.

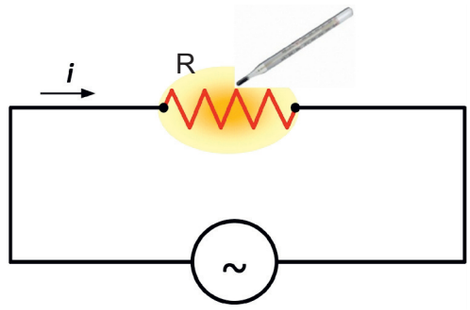
Bu kararla Volt, dünyanın çeşitli yerlerindeki metroloji laboratuvarlarında, oldukça yüksek tekrarlanabilirlikle, Josephson Gerilim Standardı (JGS) ile gerçekleştirilebilir. JGS, getirdiği tekrarlanabilirlik özelliği ile elektriksel ölçümlerde şimdiye kadar hiç sağlanmamış dünya çapında benzerlik, eş değerlik getirmiştir.

AC gerilim büyüklüğünün izlenebilirliği, DC gerilim ile ilişkilendirilmek üzere sağlanır. AC büyüklüklerin tanımlamalarında kullanılan en önemli parametre efektif değer (Root Mean Square - RMS), doğrudan sinyalin gücüyle ilişkilidir. Bir Q (t) AC sinyalin RMS değeri, bir direnç üzerinde bu sinyalin oluşturduğu güç ile aynı gücü oluşturan DC sinyalin değerine eşittir. Matematiksel tanımı ise Eşitlik (47)'de verilmektedir.

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\lim_{T\to 0} \frac{1}{T} \int_0^T Q^2(t)\,dt} \qquad (47)$$

RMS, sinyalin gücünü yansıttığı için, güç karşılaştırılması yoluyla AC gerilimin DC gerilim ile ilişkilendirilmesinde kullanılabilecek en uygun parametredir. Günümüzde en yüksek doğrulukta AC gerilim ölçümü, DC gerilim ile karşılaştırılmak suretiyle gerçekleştirilir.

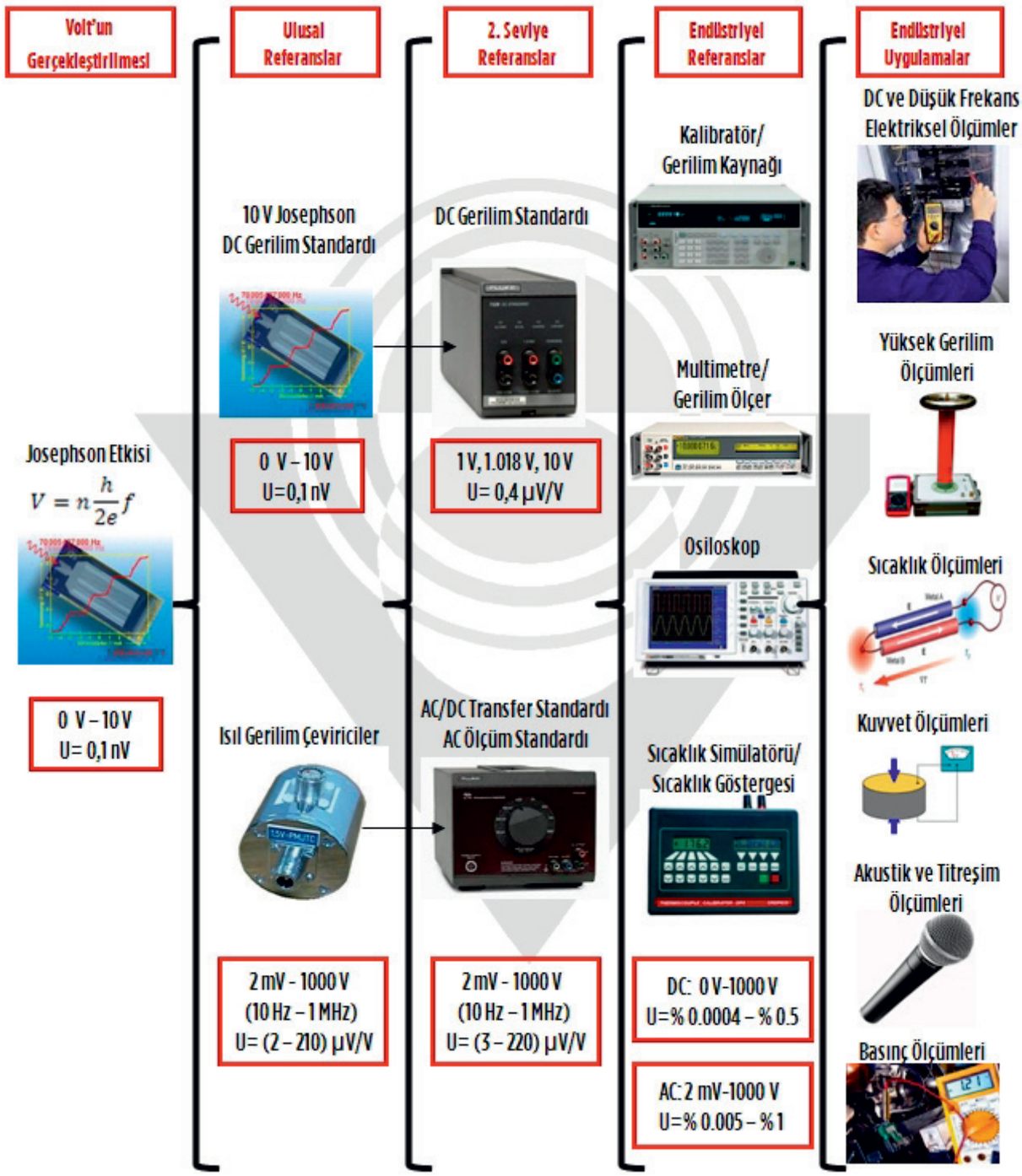
Joule kanununa göre, direnç üzerinde ortaya çıkan ısı miktarı, uygulanan AC veya DC gerilimin RMS değerinin karesi ile orantılıdır. Uygun bir sezicinin kullanılması ile AC ve DC gerilimin oluşturduğu ısıyı ve dolayısıyla yükselen sıcaklığı ölçmek ve DC ve AC gerilimleri karşılaştırmak mümkündür.



Şekil 180. RMS değerleri aynı olan AC ve DC gerilim, aynı direnç üzerinde eşit ısı oluşturur

Karşılaştırma yöntemi en basit şekliyle şu şekilde uygulanır: Şekil 180'deki sistemde, direnç üzerine gerçek değeri belirlenecek AC akım uygulanır ve direnç üzerinde oluşan sıcaklık ölçülür. Ardından, aynı direnç üzerine değeri bilinen DC akım uygulanır ve direnç üzerinde ölçülen sıcaklık aynı olacak şekilde DC akım değeri ayarlanır. Direnç üzerinde oluşan sıcaklıklar eşit olduğunda, uygulanan AC ve DC akımların RMS değerleri birbirine eşittir. Bu durumda bilinmeyen AC akım değeri, değeri bilinen DC akım ile ilişkilendirilmek suretiyle belirlenir.

Günümüzde gerilim izlenebilirliğini sanayiye aktarılmasında kullanılan standartlar Şekil 181'de verilmektedir.



Şekil 181. Gerilim izlenebilirliğinin sanayide kullanılan ölçümlere aktarımı

7.4.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

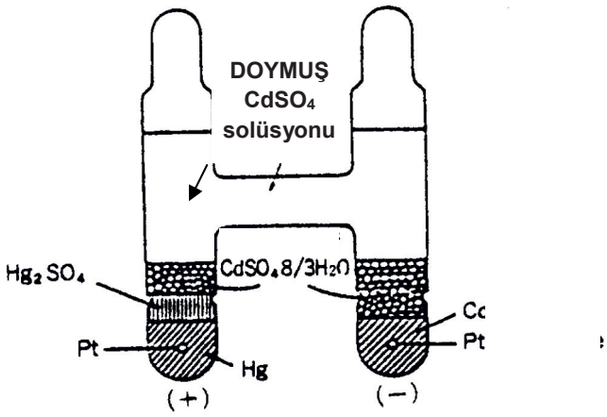
DC gerilim ölçümlerinde ilk kullanılan standart, Weston standart pilleridir. Kimyasal yapıdaki Weston pilleri, zamanla kayma ve taşınabilirlik problemleri sebebiyle, yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak yerini 1980'li yıllarda zener diyot yapılı DC gerilim standartlarına bırakmıştır. Gerilim, günümüzde en yüksek doğrulukta kuantum standardı olan Josephson Gerilim Standardı üzerinden elde edilir. Zener diyot yapılı DC gerilim standartları ise ikincil seviye ölçüm standardı olarak kullanılır.

AC gerilim ölçümlerinde ise birincil seviye ölçüm standardı AC-DC transfer standartlarıdır.

Standart Piller

İlk olarak 1892 yılında Dr. Edward Weston tarafından üretilen ve Dr. Weston'un adıyla anılan doymuş Weston Standart Pilleri, 1911 yılında elektriksel ölçümlerde primer gerilim standardı olarak kabul görmüşlerdi. Yüksek doğrulukları ve uzun süreli kararlılıkları ile metroloji dünyasında uzun süre primer gerilim standardı olarak kullanılmış olan doymuş Weston, diğer bir adıyla kadmiyum standart pilleri, gelişen teknoloji ile bu statülerini kaybetmişlerdir. Ancak bugün hala birçok ulusal metroloji enstitüsünde gerilimin elde edilmesinde kullanılırlar.

Bir Weston pili, temel olarak doymuş kadmiyum sülfat ($CdS0_4$) çözeltisi içinde kadmiyum amalgam bir anot (negatif elektrot) ile civa/civa sülfat bir katot (pozitif elektrot) içeren "H" şeklinde cam bir tüpten oluşur. Pilin çıkış gerilimi, anot ve katot üzerinde iliştirilmiş platin teller üzerinden alınır. Weston pilinin yapısı Şekil 182'de gösterilmektedir.



Şekil 182. Doymuş Weston pilinin yapısı

Doymuş bir Weston pilinin emf değeri 20 °C'de ortalama 1,0186 V'tur. Pil emf değerinde yılda (0-10) µV arasında bir değişim gözlenebilmektedir. Pillerin uzun süreli kararlılıkları, temel olarak, yapılarında yer alan elektrolitin pH değeri ile ilişkilidir.

Özel kullanım ve ölçüm teknikleri ile kararlılığı ± 0,5 µV/V civarında tutulabilen standart piller, bazı dezavantajları dolayısıyla yerlerini, neredeyse pillerle aynı kararlılığa sahip zener diyot yapılı elektronik gerilim standartlarına bırakmıştırlar. Değişime sebep olan faktörler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Standart piller sıcaklığa karşı çok duyarlıdırlar. 20 °C ortam sıcaklığında pilin sıcaklık katsayısı $-40\times10^{-6}\ °C^{-1}$'dir. Bu katsayı ortam sıcaklığının artışıyla artma gösterir. $-40\times10^{-6}\ °C^{-1}$, H şeklindeki pilin kol sıcaklık katsayılarının farkıdır; bu katsayılar pozitif kol için $310\times10^{-6}\ °C^{-1}$,

negatif kol için -350×10^{-6} °C^{-1}'dir. Bu nedenle iki kolun aynı sıcaklıkta tutulmaları da önemlidir. Ortam sıcaklığındaki ± 0,025 ºC'lik değişim veya iki kol arasındaki ± 0,002 ºC'lik sıcaklık farkı, pilin değerine 1 µV/V değerinde belirsizlik getirecektir.

- Pil üzerinden geçen akımın şiddeti ve akış süresi pilin gerilim değerini değiştirir. Örneğin 0,1 µA değerindeki akım 50 µV'luk gerilim düşüşüne sebep olur. Gerilim değerindeki bu değişime neden olan etkenler polarizasyon ve pilin 500 Ω ile 1000 Ω arasında değişen iç direncidir. Standart piller bu özelliklerinden dolayı sadece akım çekmeyen "null-balance" devrelerinde kullanılabilirler.
- Piller, akıma karşı hassasiyetleri dolayısıyla kısa devreden korunmalıdırlar.
- Standart piller titreşime karşı çok duyarlıdırlar. Elektrokimyasal yapısından dolayı en ufak bir titreşim, pilin gerilim değerinde değişime sebep olabilmektedir.
- Bu özellikleri ile, standart piller, izlenebilirliğin laboratuvarlar arasında aktarılmasında kullanılan taşınabilir "transfer standart" olarak kullanılmaya uygun değillerdir.

Bu standartlar, gerilim değerinde gelişigüzel değişimler gözlendiğinden dolayı, çoğunlukla laboratuvarlarda, sıcaklığı 30 °C'de sabit tutulan ısıl koruyucu kaplar içerisinde dörtlü veya sekizli gruplar halinde muhafaza edillirler.

Elektronik DC Gerilim Standardı

Bu standartlar, değeri 6 V ile 7 V arasında değişen bir zener diyot ve bu diyodu besleyen çevre birimlerden oluşur. Bu bakımdan standardın kararlılığı referans zener diyodun kararlılığına bağlı olduğu gibi, diğer elektronik elemanların kararlılığına da bağlıdır.

Elektronik DC Gerilim Standartları, standart pillerden farklı olarak 1 V ile 10 V arasında istenilen değerlerde gerilim çıkışına sahip olabilir. En sık kullanılan gerilim değerleri 1 V, 10 V ve standart pillerin emf değeri olan 1,018 V'dur. Yapılan ölçümler sonunda kararlılığı en iyi gerilim değerinin 10 V olduğu gözlenmiştir. Kararlılığın bu derece iyi olmasındaki etken, artık emf değerlerinin 10 V çıkışında diğer değerlere nazaran daha az etkili oluşudur. Örneğin 10 µV'luk emf değeri 10 V için 1 µV/V'a karşılık gelen bir hata iken, aynı emf değeri 1 V için 10 µV/V'luk bir hata demektir.

Elektronik DC Gerilim Standartları, pillerle kıyaslandıklarında sahip oldukları gürültüye rağmen, elektronik yapıları dolayısıyla aşağıdaki avantajlara sahiptirler:

- Şok ve titreşimlere karşı piller gibi duyarlı değildirler. Bu nedenle hareket ettirilmeleri gerilim değerlerinde bir değişime neden olmaz.
- Çıkış uçlarının kısa devre olması standarda zarar vermeyeceği gibi, kısa devrenin kaldırılmasından kısa bir süre sonra standart eski değerine kavuşurlar.
- Sıcaklık katsayıları, standart pillerden en az 100 kat daha azdır. Her gerilim değeri için sıcaklık katsayısı $0{,}01\times10^{-6}$ °C^{-1}'den azdır.

Bu özellikleri dolayısıyla elektronik DC gerilim standartları, pek çok laboratuvarda taşınabilir transfer standart olarak kullanılır.

Josephson DC Gerilim Standardı

Josephson Gerilim Standardı'nın temelini Josephson Eklemi ve Josephson Etkisi oluşturur.

1962 yılında, İngiltere'nin Cambridge kentindeki Cambridge Üniversitesi'nde yüksek lisans öğrencisi olan B. D. Josephson, aralarında çok ince bir bariyerle-oksit tabakayla ayrılmış iki süperiletken üzerinden geçen akımı formüle ederek, kendi ismi ile anılan etkiyi, Josephson Etkisi'ni buldu [117].

Josephson, elektronların bulundukları enerji seviyesinden, diğer iletkende bulunan eş bir enerji seviyesine, hiç bir gerilim uygulamadan, geçiş yapabileceklerini dikkate alarak, iki süperiletken arasındaki yalıtkan bariyerin yeterince ince olması durumunda, elektron çiftlerinin bu bariyerden geçebileceklerini ve bu geçiş nedeniyle eklem üzerinde hiçbir gerilim düşümü oluşturmadan bir akım oluşacağı hipotezini ortaya attı. Bu etki DC Josephson Etkisi olarak adlandırıldı ve ilk olarak Anderson ve Rowell tarafından 1963 yılında gözlendi.

Josephson, süperiletkendeki elektron çiftlerini bir dalga fonksiyonu olarak Eşitlik (48) ile ifade ederek, yalıtkan içinde herhangi bir noktadaki akım yoğunluğunun Eşitlik (49)'daki gibi yazılabileceğini gösterdi;

$$\psi = \sqrt{\rho}\, e^{j\theta} \tag{48}$$

$$I = I_c \sin\phi \tag{49}$$

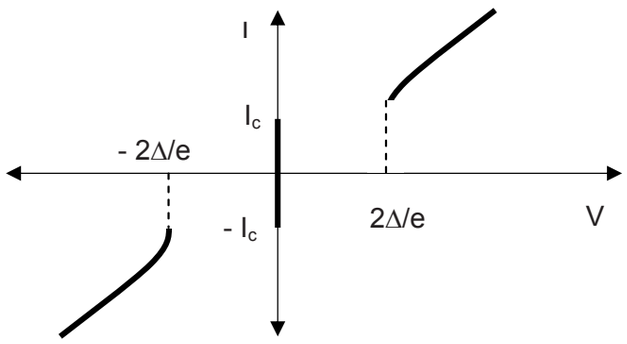
ρ : Elektron yoğunluğu

I : Süperakım

I_c : Josephson ekleminin kritik akımı

ϕ : Bariyerin iki tarafındaki elektron çiftlerinin faz farkıdır (ϕ_2-ϕ_1).

Eklemin kritik akım değeri eklemin inceliğine ve sıcaklığa bağlı bir parametredir. Eklem üzerine I_c kritik akımından fazla bir değerde akım uygulandığı durumda, bu akım normal elektronlar tarafından taşınacak ve dolayısıyla eklem üzerinde bir gerilim düşümüne sebep olacaktır. Bu durum Şekil 183'de verilen gerilim-akım karakteristiğinde verilmektedir.



Şekil 183. DC Josephson etkisi

Yine Josephson'a göre, bir DC gerilim ekleme uygulandığında, faz farkının zamanla değişimi nedeniyle, iki süperiletken arasında elektron çiftleri salınıma başlayacak ve eklem üzerinde, gerilim ile doğrudan ilişkili bir de AC süper akım oluşacaktır. Bu etki AC Josephson Etkisi olarak adlandırılır. Josephson, faz farkı değişimi ile DC gerilim arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak şu şekilde ifade etmiştir.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi e}{h} V \qquad (50)$$

e : Elektron yükü
h : Planck sabiti
V : Eklem üzerindeki DC gerilim
ϕ : Faz farkı

Josephson, eklem üzerinden akan süperakımı en genel ifadesiyle, Eşitlik (50)'nin integralini alarak Eşitlik (49)'da yerine koymak suretiyle;

$$I = I_C \sin(\frac{4\pi e}{h} Vt + \phi_0) \qquad (51)$$

olarak ifade etmiştir.

Görüldüğü gibi, V=0 ise, faz farkı sabit olduğundan eklem üzerinden DC bir akım akacak olup maksimum değeri eklem kritik akımı (I_c) kadar olacaktır. V'nin sıfırdan farklı olması durumunda ise, genliği I_c olan bir AC akım akacaktır. 2 e/h oranı yaklaşık 484 MHz/μV olduğundan, akan süperakımın frekansı düşük gerilimler için bile mikrodalga frekanslarında olacaktır. Eşitlik (51)'den de görüleceği gibi, AC süperakım frekansı ve ekleme uygulanan DC gerilim arasındaki ilişki;

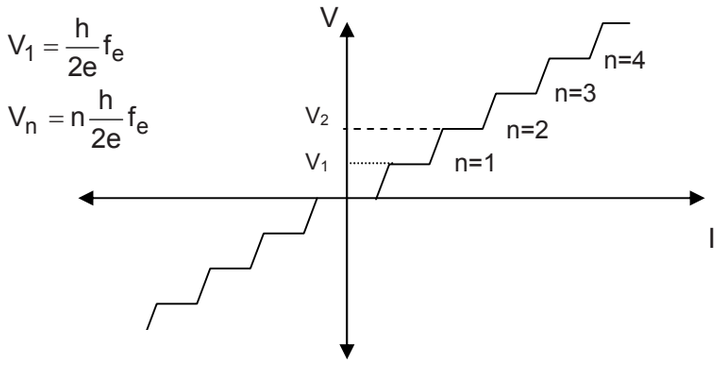
$$f = \frac{2e}{h} V \qquad (52)$$

olarak ifade edilir.

Josephson ekleminin bir diğer özelliği ise, ekleme, f_e frekansında bir mikrodalga uygulanması durumunda, eklem salınımının, uygulanan frekansa ve harmoniklerine kilitlenme yönünde eğilim göstermesidir. Bu durumda eklem üzerindeki gerilim, uygulanan frekansa bağlı olarak Eşitlik (53)'de verilmektedir.

$$V = n\frac{h}{2e} f_e \qquad n=1, 2, 3\ldots \qquad (53)$$

Eklemin gerilim-akım eğrisi çizildiğinde, akım genişliği uygulanan AC gerilimin büyüklüğüne bağlı bir "sabit gerilim adım"ları gözlenir (Şekil 184). Uygulanan frekansa bağlı olan bu sabit gerilim adımları ilk defa Shapiro tarafından gözlenmiş olduğundan, Shapiro Adımları olarak adlandırılır.



Şekil 184. Josephson ekleminde oluşan sabit gerilim adımları (Shapiro adımları)

Josephson etkisi,

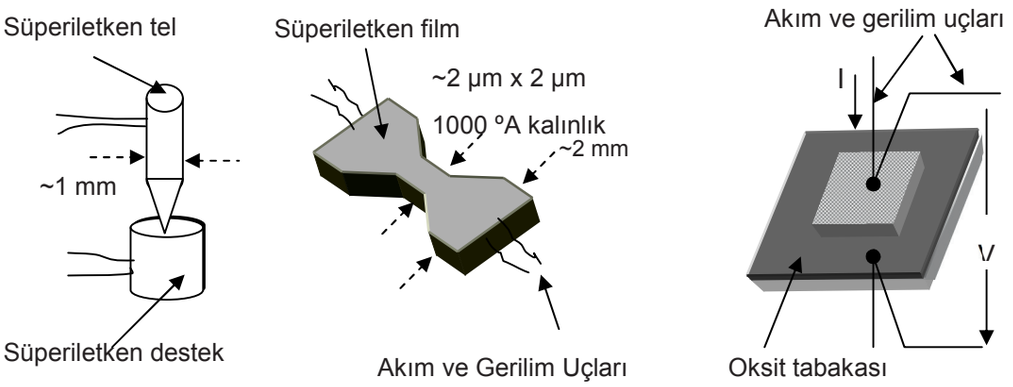
$$2eV = hf \tag{54}$$

olarak ifade edildiğinde, aslında bu etkinin bariyer üzerindeki enerji çevrimi olduğu rahatlıkla görülebilir. Bu eşitlik, Cooper çiftlerinin bir noktadan diğerine geçişi için gerekli 2 eV değerindeki enerjinin hf foton enerjisine dönüştüğünü gösterir.

Bu etkinin Josephson'dan önce benzer çalışmaları yapan araştırmacılar tarafından fark edilememesi bir tesadüfe dayanmamaktadır. Josephson'un ders aldığı ve çalışmaları üzerinde tartıştığı hocası P.W. Anderson tarafından yayınlanan bir makalede [118] durumun sebepleri şu şekilde özetlenmektedir;

"Pek çok araştırıcının daha önceden bu etkiyi gözlemlemiş olduklarını düşünmüştüm, fakat sorun şuydu ki, iki süperiletkeni çok ince bir bariyer ile ayırmak kolay değildi. Biz bu etkiyi üç duruma inanarak görebilmiştik: Birincisi, Josephson'un açıklamalarıyla, ne beklediğimizi biliyorduk. İkincisi, gördüklerimizi anlayabiliyorduk. Üçüncüsü ise, Rowell'ın yetenekleriyle iyi, temiz ve güvenilir bir eklem oluşturabildiğimize güveniyorduk."

Şekil 185'de, iki süperiletkenin yalıtkan bariyerle ayrılmış olduğu çeşitli eklem tipleri gösterilmektedir.



Şekil 185. Çeşitli zayıf eklem tipleri a) Nokta teması b) Mikroköprü c) Josephson eklemleri

Josephson etkisi, çok kısa bir zaman içerisinde, Quantum fiziğinde önemli rolü olan e/h oranının belirlenmesi amacıyla kullanılmaya başlandı. Önceleri 30×10^{-6} belirsizlikle ölçülebilen bu oran, referans gerilim standartlarının doğruluğuna bağlı olarak 1×10^{-6} değerindeki belirsizlikle ölçülebilmiştir. Ancak bir zaman sonra hesaplanan oran değerlerinde zamanla bir değişim olduğu belirlendi. Bu değişimin referans gerilim standardı olarak kullanılan Weston Standart Pillerin değerindeki kaymadan kaynaklandığı kısa sürede belirlenmiştir.

1969 yılında BIPM, Josephson etkisini, e/h oranı sabit alarak, gerilim birimi Volt'un gerçekleştirilmesinde kullanmaya başladı. Çeşitli ülkelerin metroloji laboratuvarları, benzer şekilde Volt'u, e/h oranını gerçekleştirdikleri ölçümlerle belirledikleri değerini sabit kabul ederek, Josephson etkisi üzerinden gerçekleştirmeye başladılar.

Ancak, Josephson gerilim doğruluğunun 1,018 V değerindeki standart pillere aktarılması için gerçekleştirilen ölçümlerde, Josephson ekleminden elde edilen gerilimin mV'lar mertebesinde oluşundan dolayı gerilim bölücü kullanılması gerekliliği, ölçümlere istenmeyen ve oldukça büyük bir belirsizlik katmaktaydı. Dolayısıyla bu ölçümlerde Josephson gerilim doğruluğuna yaklaşılamıyordu. Bu sebeple, Josephson eklemlerinin seri bağlanarak bir dizi elde edilmesi ve gerilim değerinin artırılması yönündeki çalışmalara başlandı. Çok kısa bir zaman içinde binlerce

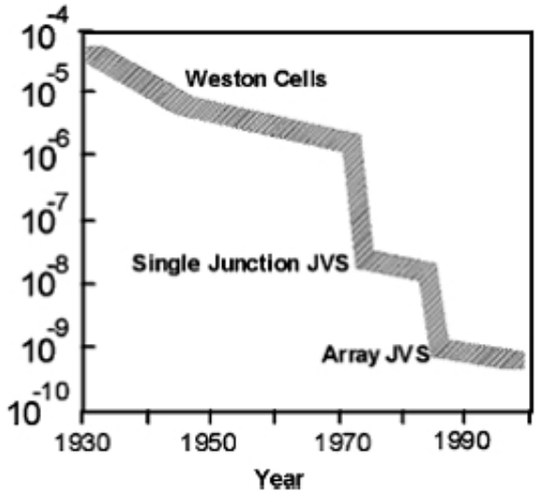
eklemin seri bağlanması ile oluşturulan Josephson eklem dizileri kullanılarak Volt'lar mertebesinde Josephson gerilimi elde edilebildi. Bu gün Josephson eklem dizileri ile 10 V'a kadar sabit ve yüksek doğrulukta gerilimler elde etmek mümkündür.

Çeşitli ulusal laboratuvarlarda Josephson eklem dizileri kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler arasında hala farklılıklar olduğu belirlenmiştir ve bu farklılığın her laboratuvarda, değişik değerlerdeki e/h oranlarının kullanılmasından kaynaklandığı saptanmıştır. Ölçümlerdeki bu tutarsızlık, CIPM tarafından alınan bir kararla 2 e/h oranı Josephson sabiti ($K_{J\text{-}90}$) olarak tanımlanması ve değerinin 483597,9 GHz/V olarak belirlenmesiyle ortadan kaldırıldı [119]. $K_{J\text{-}90}$ değeri, gerçekleştirilen pek çok e/h oran ölçümlerinin analizi ile belirlenmiş bir değerdir [120]. Bugün tüm dünyada, Josephson Gerilim Standardı ile yapılan ölçümlerde bu değer kullanılmakta ve Volt yüksek doğruluk ve tutarlılıkla Eşitlik (55) kullanılarak elde edilebilmektedir;

$$V_J = n\frac{f}{K_{J-90}} \tag{55}$$

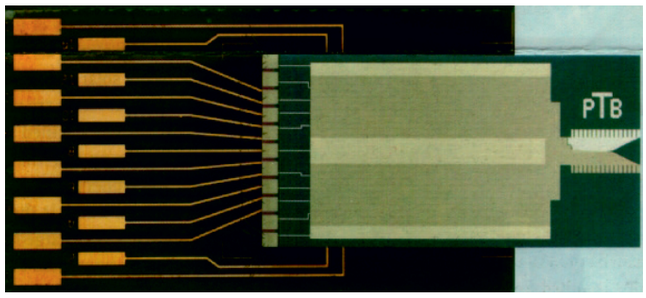
Görüldüğü gibi, Josephson gerilimi V_J, Josephson eklem tipinden, eklem geometrisinden, kullanılan materyallerden, manyetik alandan ve uygulanan mikrodalganın gücünden bağımsız olup, doğrudan uygulanan frekansa bağlıdır.

Josephson etkisi, temel fiziksel sabitler aracılığıyla gerilimi frekansa bağlayan fiziksel bir etki olduğundan, Josephson Gerilim Standardının ideal bir frekans-gerilim dönüştürücü olarak tanımlanması mümkündür.



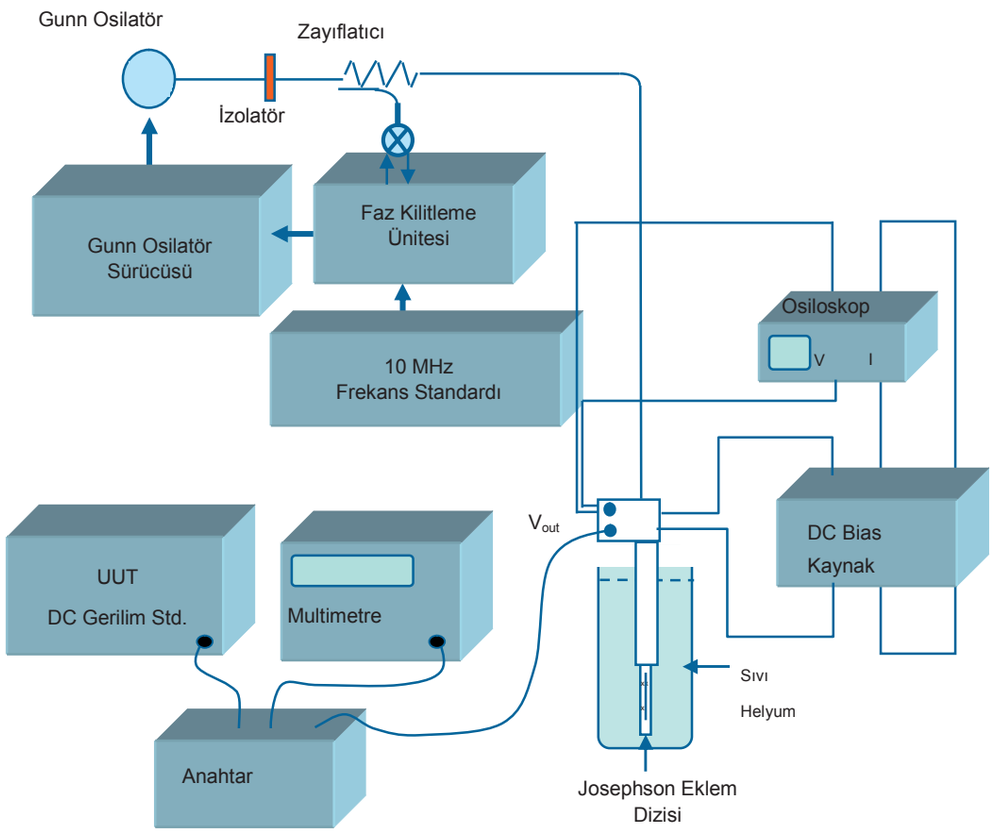
Şekil 186. 1930-2000 yılları arasında DC gerilim ölçümlerinde uyum

Şekil 186'da Ulusal Metroloji Enstitüleri arasında yapılan DC gerilim karşılaştırmalarındaki uyumun iyileşmesi yarı logaritmik grafik olarak görülür. En büyük iki gelişme 1970'lerin başlarında tek-eklem Josephson standartlarının ve 1984'ün başında seri-dizi Josephson standartlarının ortaya çıkmalarıyla yaşanmıştı. İlk tek-eklem Josephson gerilim standartları (JGS) çok küçük gerilimler (1 mV - 10 mV) üretiyordu. Eklem teknolojisindeki gelişmeler sayesinde 1994'ten sonra bir ortak bias akımı ile 1 V - 10 V çıkış gerilimleri üretebilen seri eklem dizileri üretilebilmektedir (Şekil 187).



Şekil 187. 10 Volt PTB dizisi çipi

Tipik bir konvansiyonel Josephson Gerilim Standardı sistemi Şekil 188'de görülür. Dizi manyetik olarak ekranlanmış cryoprobun ucuna WR-12 dalga kılavuzu ve üç çift filtrelenmiş bakır ölçüm teline bağlı halde sıvı helyum dolu dewar içine daldırılır. Mikrodalga gücü 70 GHz - 90 GHz aralığında çalışabilen bir Gunn diyot ile sağlanır. 10 V dizi için 15 mW civarında bir güç gereklidir. Bir zayıflatıcı diziye uygulanan gücü ayarlamak için kullanılır. Bir yönlü kuplör gücün bir kısmını harici bir frekans referansına (çoğu zaman Cs ya da Rb saati ya da GPS alıcı) faz kilitleme için faz-kilitleyen sayıcıya yönlendirir.



Şekil 188. Konvansiyonel Josephson Gerilim Standardı Sistemi blok şeması

Osiloskop ekranında I-V eğrisini oluşturmak için bir alçak frekans üçgen dalga üreteç kullanılır. Böylece güç ayarlarını optimize etmek ve sıfır-geçen adımların genişliklerini maksimize etmek için kritik akımı, I-V eğrisini ve sabit-gerilim adımlarını ölçmek mümkün olur. Güç ayarı en kritik parametre ayarıdır.

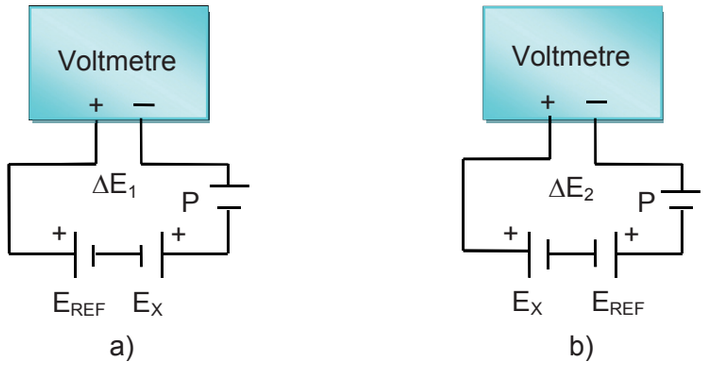
Bir gerilim kaynağının ayarlanabilir bir direnç üzerinden diziye bağlanması istenen gerilim adımının seçilmesi ve kararlı hale getirilmesini sağlar.

Kalibre edilecek cihaz bir çift tel ile kalibre edilen cihazın polaritesini değiştirmek ve dizi ile cihaz arasındaki gerilim farkını ölçmek için çoğu zaman bir anahtar ile sıfır seziciye bağlanır.

DC gerilimde elde edilen başarıdan sonra, günümüzde çalışmalar AC gerilimin doğrudan Josephson etkisi ile elde edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Darbeli sürülen (pulse driven) AC Josephson Gerilim Standardı ve Josephson Serbest Dalgaformu Sentezleyicisi (Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer) sistemleri üzerinde çalışmalar sonucunda, Josephson etkisi, audio-frekans bölgesinde ısıl gerilim çeviricilerin kalibrasyonunda başarıyla kullanılır [121].

DC Gerilim Standardının Kalibrasyon Yöntemi

DC Gerilim Standartları üzerinden geçen çok küçük akımların bile standartların gerilim değerlerinde değişimlere sebep olmaları, ölçümlerin - akım çekmemek amacıyla - potansiyometre veya benzeri yüksek iç dirençli (> 1 GΩ) voltmetre ile yapılmaları zorunluluğunu getirir. Aynı nedenle, standartlar üzerinden doğrudan voltmetre kullanılarak gerilim ölçümü hatalı olacaktır. Bu sebeple DC Gerilim Standartlarının ölçümünde "karşılaştırma metodu" kullanılır. Bu yöntemde, Şekil 189.a'da görüldüğü gibi kalibre edilecek standart, değeri bilinen bir Elektronik DC Gerilim Standardı veya Josephson Gerilim Standardı ile ters polaritede seri bağlanır ve uygun bir voltmetre ile aralarındaki gerilim farkı ölçülür. Bu şekilde standart üzerinden akan akım minimuma indirilir.



Şekil 189. DC gerilim standartlarının karşılaştırma yöntemi ile kalibrasyonu

İdealde ölçülen gerilim farkı aşağıdaki gibidir:

$$\Delta E = E_{REF} - E_X \qquad (56)$$

Burada E_{REF} değeri bilinen standardın, E_X ise kalibre edilen standardın gerilim değeridir. Gerçekte ise voltmetrede okunan değer sabit P artık gerilimini de içermektedir. P gerilim değeri Şekil 189.b'de görüldüğü gibi alınan ikinci bir ölçümle hesaplanır ve ölçüm sonucundan uzaklaştırılır.

ΔE_1 ve ΔE_2 değerleri birinci ve ikinci ölçümlerde voltmetre ile ölçülen gerilim değerleri matematiksel olarak ;

$$\Delta E_1 = E_{REF} - E_X - P \qquad (57)$$

$$\Delta E_2 = E_X - E_{REF} - P \qquad (58)$$

şeklinde ifade edilebilirler. İki ölçüm sonunda ölçülen gerilim değerlerinin toplamı bize sabit P gerilimini verirken, farkları da P geriliminden bağımsız olarak iki standardın gerilim değerleri arasındaki farkı verir.

$$\Delta E_1 + \Delta E_2 = -2\,P \qquad (59)$$

$$\Delta E_1 - \Delta E_2 = 2\,(E_{REF} - E_X) \qquad (60)$$

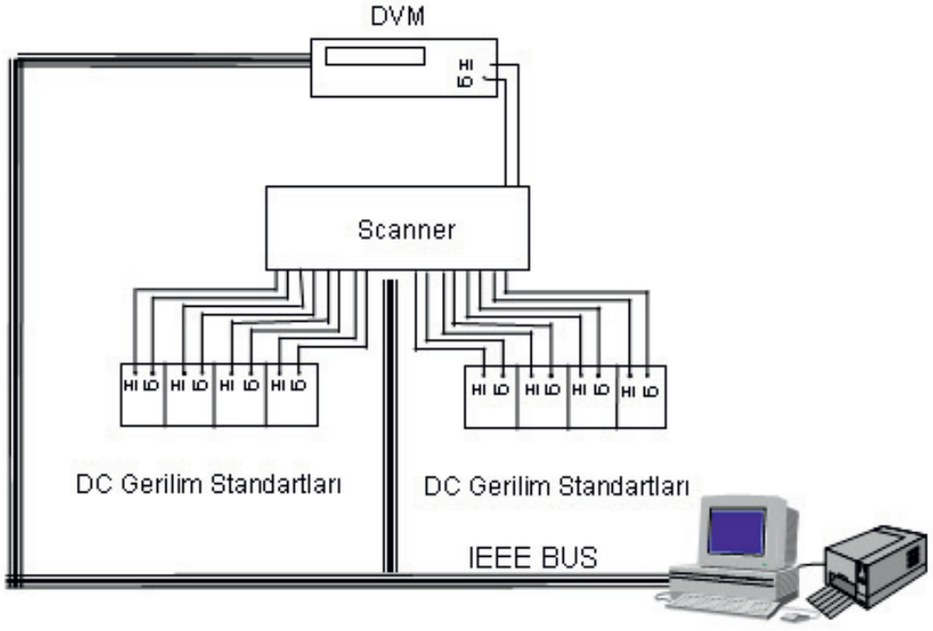
Dolayısıyla kalibre edilen standardın değeri;

$$E_x = E_{REF} - \frac{\Delta E_1 - \Delta E_2}{2} \qquad (61)$$

olarak belirlenir.

DC gerilim standartlarının değerlerindeki değişimi gözlemenin en etkin yolu, standartlardan bir grup oluşturarak, periyodik alınan ölçümler ile her bir standardın önceden belirlenmiş grup ortalamasından sapmasının izlenmesidir. Bu amaçla her DC gerilim standardı referans gerilim ile karşılaştırılır ve yapılan hesaplamalar ile ortalamadan sapması belirlenir.

Grup içindeki her standart çifti için bu ölçümler, periyodik aralıklarla tekrarlanır. Daha sonra alınan veriler değerlendirilerek, standardın grup ortalamasından sapması hesaplanır. Böylece standardın kararlılığı ve performansı belirlenir. Şekil 190'da standartların karşılaştırılmalarında kullanılan bir bilgisayar kontrollü ölçüm sistemi verilmiştir.



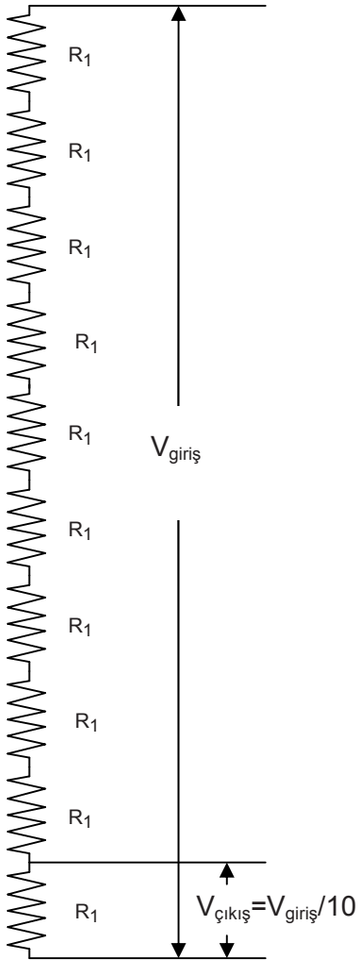
Şekil 190. DC Gerilim Standartların karşılaştırılmasında kullanılan ölçüm sistemi

DC Gerilim Bölücüler

DC gerilim standartlarının 0 V-10 V çıkış gerilimine sahip olmaları sebebiyle, 10 V – 1000 V aralığında DC gerilim izlenebilirliği, DC gerilim bölücüleri kullanılarak DC gerilim oranı ile sağlanır.

Dirençsel Gerilim Bölücüler

Birincil seviyede kullanılan oranlama teknikleri dirençsel bölücülere dayanır. Yapısı Şekil 191'de açıklandığı gibi basittir. Gerilim oranını 10^{-7} mertebesindeki belirsizliklerle belirlemek istediğimizde bölüm oranını belirlemede ve bölücü tasarımında dikkate almamız gereken birçok parametre olmaktadır. Bu parametrelerle birlikte bölücüyü kullanma amacımız bölücü mimarisini etkilemektedir. Burada birincil seviyede kullanılan iki tip bölücü yapısı açıklanmaktadır.



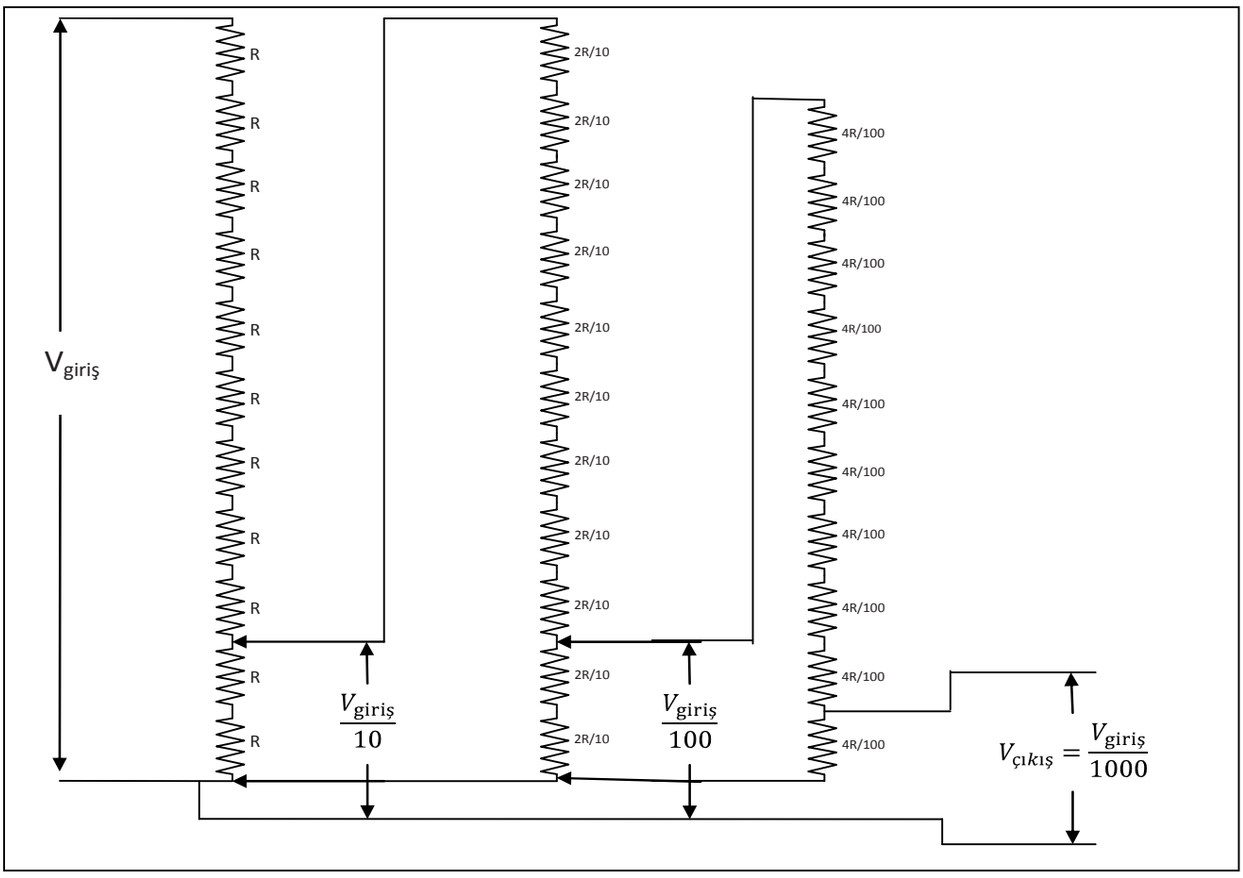
Şekil 191. Yalın bölücü

Yalın bölücü: Bölüm oranı en yüksek doğrulukla belirlenebilen bölücülerdir. Birbirine seri bağlı anma değerleri birbirine eşit ve değerleri birbirine yakın (tercihen 10 ppm'den yakın değerli) dirençlerin seri bağlanmasıyla oluşturulur. Dirençlerin anma değerleri kontak dirençlerinin ihmal edilebileceği bir değerde (10 kΩ'dan büyük) seçilir. Bu tür bir bölücü ile en yaygın kullanılan oran belirleme tekniği, bölücüdeki her bir direncin değerini bir Wheatstone köprüsü aracılığıyla çıkış direncine eşitlemektir (Bu şekilde oran belirleyebilmek için çıkış direnci haricindeki dirençlere seri potlar bağlamak gerekir). Bir diğer oran belirleme tekniği de bölücüdeki her bir direncin çıkış direncinden farkını hassas bir şekilde belirleyerek bölüm oranını hesaplamaktır. Bu durumda direnç değerleri arasındaki farkın oran belirsizliğini nasıl etkileyeceği dikkate alınmalıdır.

Kelvin Varley Gerilim Bölücü: Yüksek çözünürlüklü gerilim oranı elde etmek üzere tasarlanmış bir bölücüdür. Her birine dekat adı verilen arka arkaya bağlanmış yalın bölücülerden oluşur. En çok yedi dekatlık Kelvin Varley gerilim bölücüleri mevcuttur. Yedi dekatlık bir bölücü ile $V_{çıkış}$ / $V_{giriş}$ = 0,0000001 V/V katlarında bölüm oranları elde edilebilmektedir. Yapısı nedeniyle güç katsayısı iyi değildir. Bu sebeple yüksek gerilimlerin ölçeklenmesinde tercih edilmezler [122]. Şekil 192'de üç dekatlık bir Kelvin Varley gerilim bölücünün yapısı gösterilmektedir.

Kelvin Varley gerilim bölücünün bölüm oranı doğruluğu yine her bir direncinin birbirine eşitlenmesi ile sağlanır. Dirençlerin ayarlanamadığı durumlarda referans dirençten sapma uygun şekilde değerlendirilerek bölüm oranı hesaplanabilir [122].

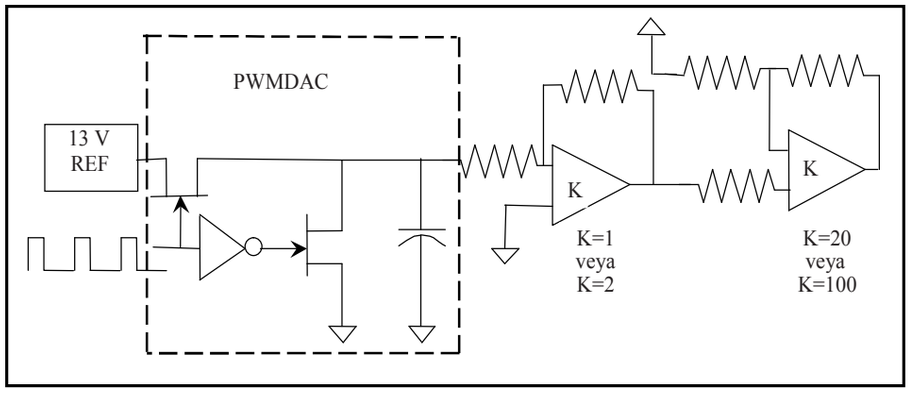
Gerilim bölücülerin kalibrasyonu ve kullanımı zahmetlidir. Bölücülü ölçümlerin doğru yapılabilmesi, belirsizlik bileşenlerinin tayini, temel devre analizi bilgisi ve tecrübe gerektirir.



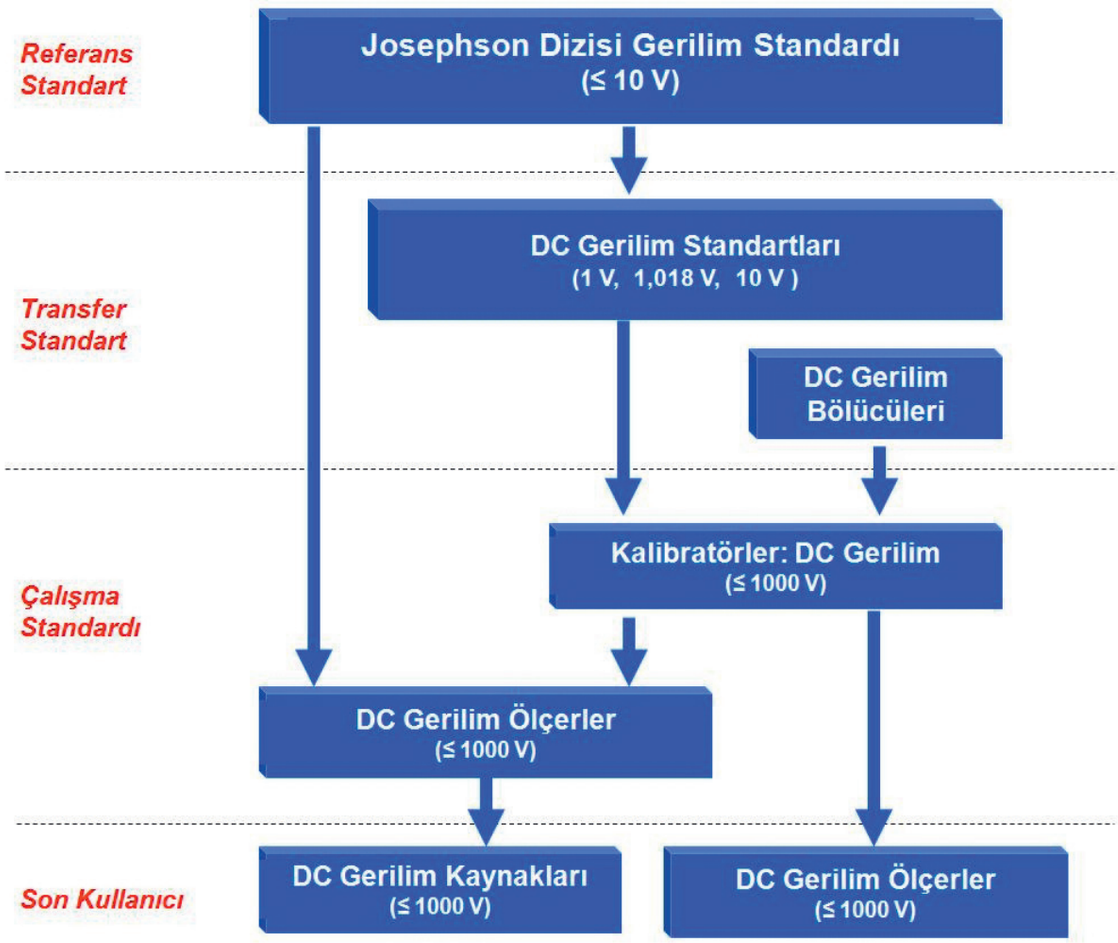
Şekil 192. Kelvin Varley Gerilim Bölücü yapısı

PWMDAC

Darbe genişlik modülasyonlu sayısal analog dönüştürücüler (PWMDAC), değeri çok iyi bilinen 13 V değerindeki bir DC referans gerilimin çıkışına bağlı bir anahtar, ve anahtar çıkışına bağlanan alçak geçiren bir filtreden oluşur (Şekil 193). Filtrenin girişi toprak ile referans arasında periyodik olarak anahtarlanır. Sonuç olarak filtre girişine darbe periyot oranı değişen bir kare dalga uygulanır. Bu kare dalganın darbe periyot oranı % 0 - % 100 arasında değiştirilebilir. Alçak geçiren filtrenin çıkışında elde edilen işaret ise referansın darbe periyot oranıyla çarpımıdır. Yüksek doğruluklu kalibratörler 10 V kademesindeki gerilim ölçeğini bu dönüştürücülerle oluştururlar. Dirençsel bölücülerden daha iyi olmaları beklenir. Ancak hala dirençsel bölücülerle karakterize edilmektedirler [123].



Şekil 193. Bir DC gerilim kalibratöründe PWMDAC



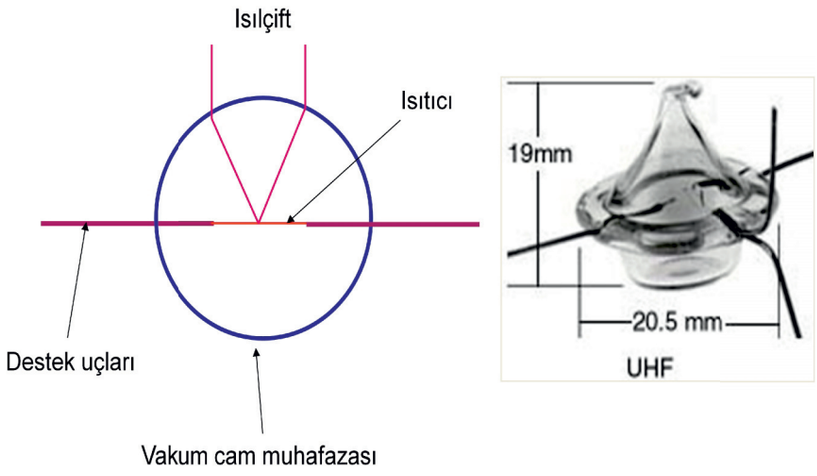
Şekil 194. DC Gerilim izlenebilirliği

AC-DC Gerilim Transfer Standardı (Isıl Gerilim Çevirici)

AC ölçümlerde kullanılan cihazlar, çalışma prensiplerine bağlı olarak doğruluk bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler.

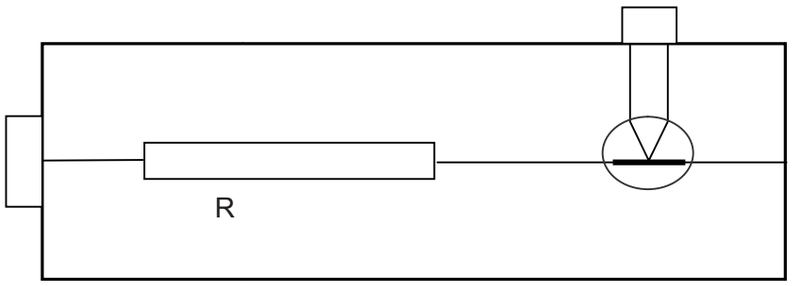
Tek-Eklemli Isıl Çeviriciler

Yüksek doğruluklu AC ölçümlerde en yaygın kullanılan bu çeviricinin yapısında, isminden de anlaşılacağı üzere, tek bir ısılçift bulundurur. Tek-Eklemli Isıl Çeviriciler, ince, düz, akıma karşı yüksek hassasiyete sahip bir tel ve üzerine yerleştirilmiş ancak elektriksel olarak izoleli bir ısıl-çiftten oluşur. Bu yapı cam bir vakum ortamına Şekil 195'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 195. Isıl-çift yapılı bir ısıl çevirici

Direnç değeri 100 Ω, bu direnç üzerinden geçen nominal akım değeri ise 5 mA civarında olduğundan uygulanabilecek giriş gerilim değeri 0,5 V ile sınırlıdır. Dolayısıyla yüksek gerilimlerde, bu nominal akımı 5 mA ile sınırlı tutmak için termo-elementin girişine uygun bir direnç bağlanır. Bu yapı aşağıda Şekil 196'da gösterilmektedir.



Şekil 196. Tek eklemli ısıl gerilim çevirici

Tek-Eklemli Isıl Çevirici içinde termal-element girişine bağlanan direnç, ince–film direnci olup, düşük indüktansa ve düşük ısıl katsayıya sahiptir. Dış ortamdan kaynaklanan etkileri (EM dalgalar, sıcaklık değişimi vb.) ortadan kaldırmak için ısıl çevirici, nikel kaplı çelikten oluşan bir gövde ile kaplanmaktadır.

Termal-element girişine bağlanan direncin değerine bağlı olarak tek-eklemli ısıl çeviriciler çeşitli gerilim değerlerinde mevcuttur (1 V, 2 V, 10 V gibi). Ayrıca her bir ısıl çevirici, nominal gerilim değerinin % (30 – 100) aralığında bir çalışma bölgesine sahip olup, transfer fark değerleri, frekans aynı kalmak suretiyle, bu aralıktaki her gerilim değeri için aynıdır. Örneğin 10 V bir ısıl

çevirici 3 V ile 10 V arasındaki herhangi bir gerilim değerinde kullanılabilir. Ayrıca tek-eklemli ısıl çeviricilerin frekans çalışma aralığı, 10 Hz – 100 MHz 'dir.

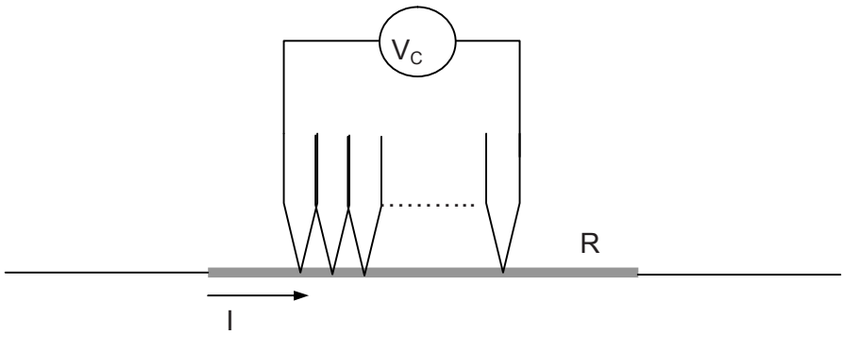
Bu cihazların önemli bir dezavantajı, termal element içerisindeki direncin akım değişimine aşırı hassasiyeti sebebiyle, ısıl çevirici girişine uygulanacak gerilimin kısa bir süre için dahi olsa nominal gerilim değerini aşmasının cihaza zarar vermesidir.

Özel bazı cihazlarda, çeşitli gerilim noktaları için kullanılması gereken direnç değerleri bir anahtarla seçilecek biçimde dizayn edilerek, bir tek cihaz bünyesinde birden fazla gerilim değeri için ölçüm olanağı sağlanmaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, tek-eklemli ısıl çeviricilerde transfer farkının ortaya çıkmasına sebep olan en önemli etkilerin, özellikle audio frekanslarda Thomson ve Peltier etkileri, daha yüksek frekanslarda ise skin etkisi ve dielektrik kayıplar oldukları görülmüştür.

Çok-Eklemli Isıl Çeviriciler

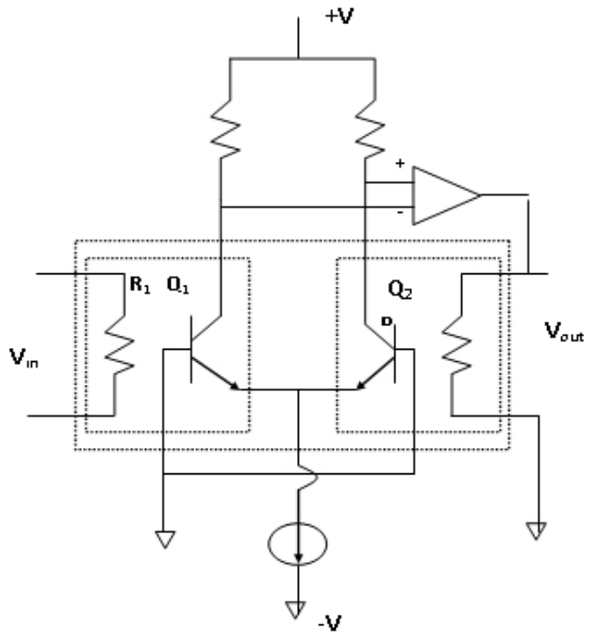
Tek-Eklemli Isıl Çeviricilerden farklı olarak Şekil 197'de görüldüğü gibi termal-elementte birbirine seri bağlı birden fazla ısılçift bulunur. Bu nedenle her bir ısılçift çıkışının toplamı olan çıkış gerilimleri, tek-eklemli ısıl çeviriciye oranla daha yüksektir. Ayrıca özellikle audio frekanslarda tek-eklemli ısıl çeviricilerin transfer fark değerlerini etkileyen Thomson ve Peltier etkileri önemli derecede giderilmiştir. Dolayısıyla bu frekans bandında transfer fark değerlerinin sıfıra çok yakın oldukları teorik ve deneysel olarak belirlenmiştir. Sahip olduğu avantajlardan dolayı bugün AC Metrolojide 1 MHz'e kadar primer seviyede transfer standardı olarak kabul görmektedir.



Şekil 197. Çok eklemli ısıl çevirici

Elektronik Yapılı Isıl Çeviriciler

Tek-eklemli ısıl çeviricilerin (single-junction thermal converter / SJTC) ve çok-eklemli ısıl çeviricilerin (multi-junction thermal converter / MJTC) ortam sıcaklığına karşı hassasiyetleri, 250 mV rms değerinin altındaki gerilimler için ölçüm yapamamaları ve düşük gerilim çıkışları gibi dezavantajları ölçümleri zorlaştırmaktadır. Son zamanlarda yaygın olarak kullanılan elektronik yapılı transfer standartları, yapılarında elektronik "RMS sensör" tümleşik devresi bulundurmakta ve yüksek çıkış gerilimine, hızlı "settling" özelliğine ve güçlü koruma ünitesine sahiptirler. Ayrıca bu standartlar, 2 mV - 1100 V (10 Hz - 1 MHz) çalışma aralığına sahiptirler. Fluke tarafından tasarlanan bu sensörler Fluke 792A AC-DC Transfer Standart ve Fluke 5790A AC Ölçüm Standardı cihazlarında kullanılmaktadır.



Şekil 198. Elektronik yapılı ısıl çevirici

Elektronik RMS sensör yapılı transfer standart Şekil 198'de görüldüğü gibi iki termal çeviriciden oluşur. Direnç üzerinde harcanan güç, diğer standartlardan farklı olarak ısılçift tarafından değil, bir transistörün baz-emitör eklemi tarafından algılanır. Geri besleme devresi ile V_{out} uçlarında bir DC gerilim oluşturulur. Böylece bütün ısıl çeviricilerde kullanılan ve bir direncin, girişlerine uygulanan gerilimle orantılı olarak üzerinde oluşacak sıcaklığın algılanmasına dayalı ölçüm yöntemi, elektronik rms sensör kullanılarak gerçekleştirilmiş olmaktadır.

AC-DC Transfer Farkı

Teorik olarak aynı etkinlikteki DC ve AC giriş büyüklüklerine karşın, ısıl çevirici çıkışlarının aynı olması beklenir. Pratikte bu durum farklı olup, ısıl çevirici çıkışında aynı değeri verecek olan, AC ve DC giriş büyüklükleri arasında AC-DC transfer farkı olarak adlandırılan bir fark oluşmaktadır. Bağıl olarak ifade edilen bu fark, ısıl çeviriciyi karakterize etmekte kullanılan temel parametredir.

Joule yasasına göre ideal bir direnç üzerine DC gerilim ya da bu değere eşit AC rms gerilim değerleri uygulandığında direnç üzerinde oluşacak güç ve bununla orantılı sıcaklık değerlerinin eşit olması beklenmektedir. Ancak bazı etkilerden dolayı bu eşitlik sağlanamamakta ve bir fark değeri oluşmaktadır. Bu fark değeri AC-DC transfer farkı olarak adlandırılmakta ve matematiksel olarak aşağıda görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$\delta = \frac{V_{ac} - V_{dc}}{V_{dc}}\Bigg|_{E_{ac}=E_{dc}} \qquad (62)$$

δ : AC-DC transfer farkı [V/V]

V_{ac} : Isıl çevirici girişine uygulanan AC gerilimin rms değeri [V]

V_{dc} : Isıl çevirici çıkışında AC ile aynı değeri verecek biçimde ayarlanmış (+) ve (-) polaritedeki DC gerilim giriş değerlerinin ortalaması* [V]

E_{ac} : AC gerilim girişine karşılık ısıl çevirici çıkış gerilimi [V]

E_{dc} : DC gerilim girişine karşılık ısıl çevirici çıkış gerilimi [V]

Bu parametre genel olarak 10^{-6} mertebesine olup ısıl çevirici sertifikalarında kullanıldığı her gerilim-frekans noktası için beyan edilir. Tablo 17'de bir ısıl gerilim çeviricinin AC-DC transfer farkları gösterilmiştir.

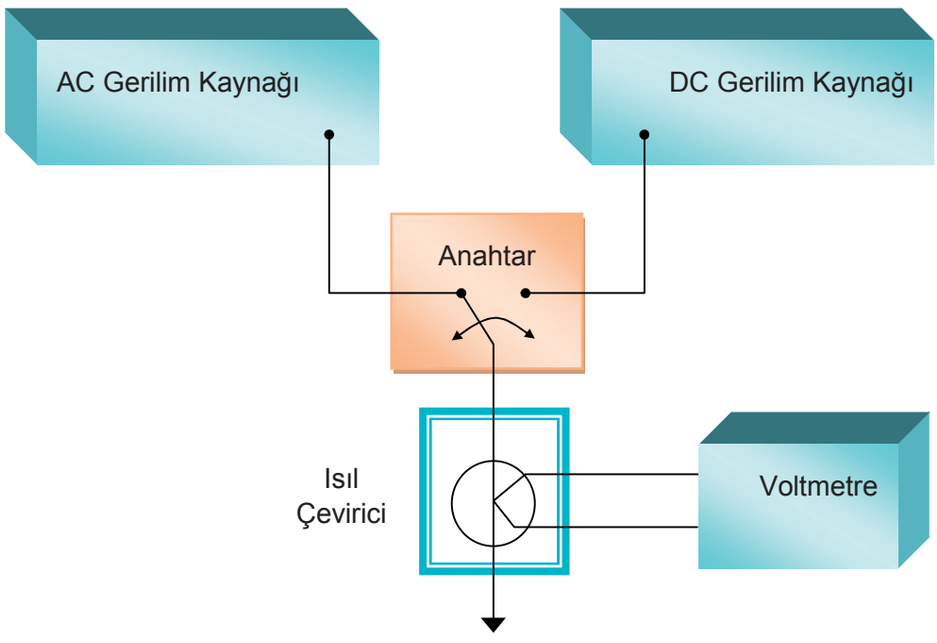
Tablo 17. Örnek ısıl gerilim çevirici AC-DC transfer fark tablosu

Gerilim / Frekans	AC-DC Transfer Farkı (µV/V)								
	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz	500 kHz	1 MHz
1 V	14	3	0	-1	-3	-6	-14	-26	-43

Pozitif AC-DC transfer farkı, ısıl çevirici üzerinde aynı çıkışı elde edilmesi için uygulanan AC gerilimin DC gerilimden daha büyük olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin AC-DC transfer farkları Tablo 17'de verilen ısıl çevirici için, ısıl çeviriciye uygulanan 500 kHz frekans değerinde bir AC gerilim, aynı çıkışı veren DC gerilim değerinden 26 µV/V daha düşüktür.

Isıl gerilim çevirici, nominal gerilim değerinin % (30 – 100) aralığında bir çalışma bölgesine sahip olup, transfer fark değerleri, frekans aynı kalmak suretiyle, bu aralıktaki her gerilim değeri için aynıdır. Örneğin 10 V bir ısıl çevirici 3 V ile 10 V arasındaki herhangi bir gerilim değerinde aynı transfer fark değerinde kullanılabilmektedir. Isıl çeviricilerin frekans çalışma aralığı, 10 Hz – 100 MHz'dir. Özel tasarlanmış bazı ısıl çeviriciler için frekans çalışma bölgesi 1 GHz'e kadar çıkmaktadır.

Daha önce belirtildiği gibi, AC gerilim ısıl çeviriciler vasıtasıyla DC gerilimi ile karşılaştırılarak ölçülmektedir. Ölçüm sisteminin temelini, AC-DC transfer farkı bilinen bir ısıl çevirici, değeri bilinen bir DC gerilim kaynağı ve ısıl çeviricinin çıkış gerilimini ölçmede kullanılan voltmetre oluşturur. Şekil 199'da bir AC gerilim kaynağı kalibrasyonu için ölçüm sistemi verilmektedir.

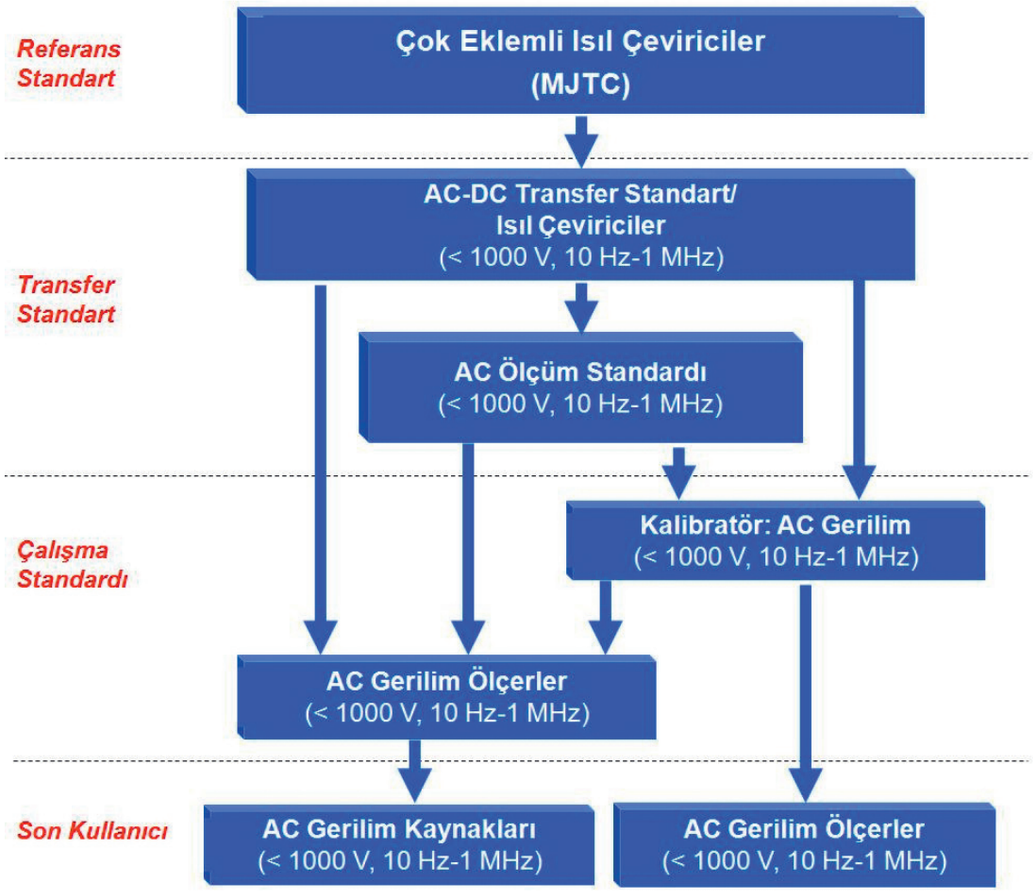


Şekil 199. Isıl çevirici ile AC gerilim ölçüm sistemi

Ölçüm, anahtarın konumunu AC kaynağı konumuna alınarak ısıl çeviriciye test edilen AC akımının uygulanması ile başlar. Isıl çevirici çıkışındaki gerilim kararlı hale geldiğinde, voltmetre ile ölçülen DC gerilim değeri kaydedilir. Anahtar hızlı bir şekilde DC konumuna alınarak, voltmetre üzerinde daha önce kaydedilen DC gerilim değeri görülene kadar, referans DC gerilim kaynağı çıkışı ayarlanır ve değeri kaydedilir. DC gerilimin polaritesi değiştirerek prosedür tekrarlanır. Her iki polaritedeki uygulanan DC gerilimlerin mutlak ortalaması alınır ve AC gerilim değeri Eşitlik (63) kullanılarak hesaplanır:

$$V_{AC} = V_{DC} \times (1+\delta) \quad (63)$$

Eşitlik (63)'de, V_{AC} kalibre edilen AC kaynaktan uygulanan gerçek AC gerilim değeri, V_{DC} değeri bilinen DC gerilim, $\delta_{AC\text{-}DC}$ ise transfer standardına ait AC-DC transfer farkıdır.



Şekil 200. AC Gerilim izlenebilirliği

7.4.2.3 Yüksek Gerilim Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Yüksek gerilimler, üretimi kadar ölçülmesi de zor olan özel bir alandır ve ölçülecek büyüklüğün genlik değerinin çok yüksek olması sebebiyle alışılagelmiş ölçüm cihazları kullanılarak doğrudan ölçümü imkansızdır. Bu nedenle yüksek gerilim ölçümlerinde özel ölçüm teknikleri ve sistemleri kullanılmaktadır. Yüksek gerilim ölçümlerinde kullanılan yapıların tümü için ölçüm sistemi kavramı kullanılır. Bir yüksek gerilim ölçüm sistemi genel olarak dönüştürücü, iletici ve kaydedici cihazlardan oluşur. Yüksek gerilimleri ölçülebilir seviyeye düşüren dönüştürücü elemanlara en iyi örnek gerilim bölücüler veya transformatörlerdir. Bölünmüş gerilim sinyalinin iletildiği veya işlenebilir hale getirildiği iletici elemanlar, kablolar veya uyumlaştırıcılardan oluşmaktadır. Bölünmüş gerilim işaretinin analizinin gerçekleştirildiği kaydedici elemanlar grubunda da voltmetreler, osiloskoplar veya sayısal kaydediciler bulunmaktadır. Bir yüksek gerilim ölçüm sistemini oluşturan bu birimlerin birbirleri ile uyum içinde çalışması zorunludur. Bunun için tüm birimlerin gerekli parametrelerinin birbirleriyle uyumlu olması ölçüm doğruluğu açısından vazgeçilmez bir konudur [124].

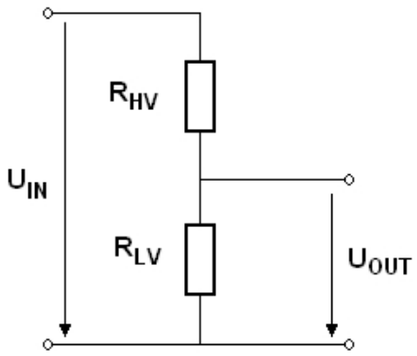
Yüksek gerilim konu başlığı altında üç farklı gerilim türünden bahsedilebilir. Bunlar;

- DC (doğru akım) yüksek gerilim
- AC (alternatif akım) yüksek gerilim
- Darbe(impulse) yüksek gerilim

şeklindedir. Yukarıda belirtilen üç tür için de günümüzdeki en yaygın yöntem, yüksek gerilim bölücüleri kullanılarak bölünmüş gerilim değerinin uygun bir ölçüm cihazı ile ölçülmesi tekniğidir. Bu aşamada ölçüm sisteminde kullanılan yüksek gerilim bölücünün bölüm oranı parametresinin doğru olarak bilinmesi çok önemlidir. Çünkü ölçülen yüksek gerilim değeri ile cihazdan okunan alçak gerilim değeri arasındaki oransal ilişkinin doğru kurulması, ancak bölücünün bölüm oranının doğru olarak bilinmesi ile mümkündür [124].

a-) DC Yüksek Gerilim Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

DC yüksek gerilim ölçümlerinde dirençsel gerilim bölücüler kullanılır. Bir dirençsel gerilim bölücüsünün temel eşdeğer devresi Şekil 201'de verilmiştir. Yaklaşık 40 kV'lara kadar el tipi prob olarak üretilen bölücüler, daha yüksek gerilim değerlerinde, ortaya çıkan kaçak kapasite etkilerini giderebilmek için "Park" tipi DC yüksek gerilim bölücü yapısında olmaktadırlar. J.H. Park tarafından 1962 yılında geliştirilen bu teknik ile yüksek gerilim dirençlerinin helezonik bir yapıda dizilmesi ile kaçak kapasite etkileri yok edilmektedir. Ayrıca yüksek gerilim dirençlerinin sıcaklık katsayıları ayrı ayrı ölçülerek ve birbirine göre negatif katsayıda olan direnç çiftleri oluşturularak bölücünün toplam sıcaklık katsayısının düşürülmesi de mümkün olmaktadır. Şekil 202'de 100 kV'luk referans DC yüksek gerilim bölücü görülmektedir [125].



Şekil 201. Dirençsel gerilim bölücünün temel eşdeğer devresi

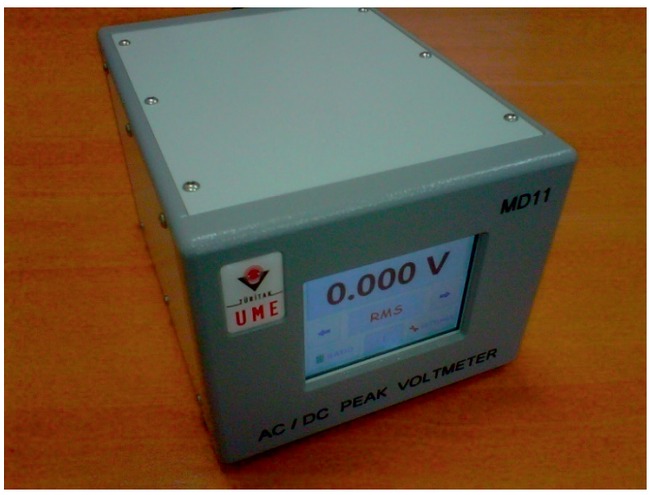
Dirençsel gerilim bölücülerin bölüm oranı Eşitlik (64)'de verilmiştir. Burada R_{HV} ve R_{LV} sırası ile bölücünün yüksek ve alçak gerilim dirençlerini ifade eder.

$$F = \frac{R_{HV}+R_{LV}}{R_{LV}} \qquad (64)$$



Şekil 202. TÜBİTAK UME yapımı DC yüksek gerilim bölücü

DC yüksek gerilim ölçümlerinde kullanılan bölücüler özel bağlantı kablosu ve ölçüm cihazı da kullanılarak bir DC yüksek gerilim ölçüm sistemini oluşturmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi bileşenler arasındaki empedans uyumu büyük önem taşır. Gerilim bölücüsünün alçak gerilim çıkışının direnci ile ölçüm kablosunun ve ölçüm cihazının giriş terminallerindeki empedans uyumsuzluğu ciddi ölçüm hatalarına yol açmaktadır. Bu nedenle ölçüm sisteminin analizinde ölçüm ekipmanlarının uyumu çok büyük önem taşımaktadır. Şekil 203'de DC ve AC yüksek gerilim ölçmelerinde kullanılan bir tepe değer ölçüm cihazı görülmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi hem AC hem de DC olarak çalışabilen bu özel cihazların giriş empedansları, bilinen voltmetrelerin aksine oldukça yüksektir (>100 MΩ) [126].



Şekil 203. TÜBİTAK UME yapımı AC/DC tepe değer ölçüm cihazı

b-) AC Yüksek Gerilim Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Yüksek gerilimlerde delinme (bozulma) veya boşalma (deşarj) olayları, gerilimin tepe değerinde ve µs'ler mertebesinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle özellikle AC yüksek gerilim ölçümlerinde gerilimin tepe değeri (V_{PEAK} ve $V_{PEAK/\sqrt{2}}$) ölçümü çok önemlidir. Bilindiği gibi hiçbir harmonik içermeyen saf bir sinüs işaretinin (offset değeri 0 olmak, yani DC bileşeni olmamak koşulu ile) V_{RMS} değeri ile $V_{PEAK/\sqrt{2}}$ değeri birbirine eşit olacaktır. Fakat yüksek gerilim alanında gerçekleştirilen uygulamalarda harmoniksiz saf bir sinüs işareti şeklinde AC yüksek gerilim olması söz konusu değildir. Bu sebeple ölçümlerin V_{RMS} değeri yerine V_{PEAK} ya da $V_{PEAK/\sqrt{2}}$ için gerçekleştirilmesi ayrıca önemli bir diğer hususdur [124].

AC yüksek gerilim ölçümlerinde dönüştürücü elemanlar olarak iki tip cihaz ve farklı metotlar kullanılmaktadır. Bunlar;

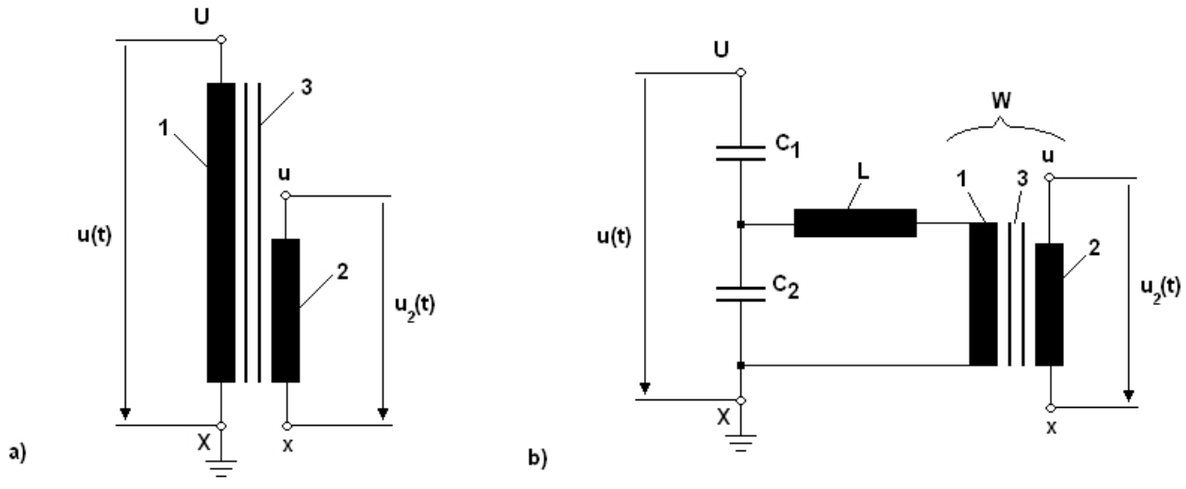
1. Gerilim transformatörleri ile ölçüm
2. Kapasitif gerilim bölücüler ile ölçüm

yöntemleridir.

Gerilim Transformatörleri ile Ölçüm

AC yüksek gerilimler, gerilim transformatörleri kullanılarak çok doğru olarak ölçülebilmektedir. Gerilim transformatörleri, yüksek gerilim enerji iletim devrelerinde çok kullanılmakla birlikte, laboratuvar ortamlarında 100 kV'dan daha büyük gerilimlerin ölçülmesinde, fiziki koşullar göz önünde bulundurulduğunda tercih edilmezler.

Şekil 204'de, bir ucu topraklı gerilimlerin ölçülmesinde kullanılan yalıtılmış tek kutuplu endüktif ve kapasitif tip ölçü transformatörlerinin devre şemaları gösterilmektedir. Burada 1: Primer sargıları, 2: Sekonder sargıları, 3: Çekirdek nüveyi, C_1 - C_2: Kapasitif bölücüyü, L: Rezonans endüktansı, W: Uyumlaştırıcı transformatörü göstermektedir.

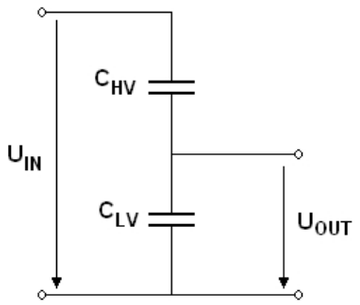


Şekil 204. Gerilim transformatörlerinin temel devreleri a) Endüktif b) Kapasitif

AC yüksek gerilim ölçümlerinde gerilim transformatörlerinin kullanımının ortaya çıkardığı en büyük sorun, sisteme getirdiği kapasitif ve endüktif yüklerdir [124][126].

Kapasitif Gerilim Bölücüler ile Ölçüm

Günümüzde en çok kullanılan ve en doğru sonuçların alınabildiği ölçüm yöntemidir. Şekil 205'de kapasitif gerilim bölücünün eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 205. Kapasitif gerilim bölücünün temel eşdeğer devresi

Kapasitif gerilim bölücülerin empedans değeri olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu şekilde frekans bağımlılığı azaltılmakta ve yüke olan etki minimuma indirgenmiş olmaktadır. Kapasitif gerilim bölücülerin bölüm oranı Eşitlik (65)'de verilmiştir. Burada C_{HV} ve C_{LV} sırası ile bölücünün yüksek ve alçak gerilim kapasitörlerinin kapasitans ifadeleridir.

$$F=\frac{C_{HV}+C_{LV}}{C_{HV}} \tag{65}$$

AC yüksek gerilim ölçümlerinde dirençsel gerilim bölücüler de kullanılabilir. Ancak kayıp gücünün yüksek olması durumunda bölücüdeki kararlılık (stabilite) sorununu ortaya çıkardığından tercih edilmemektedir. Dirençsel gerilim bölücülerin AC yüksek gerilim ölçümlerinde kullanılmasında bir diğer problem de ölçüm sapmalarına yol açan, kapasitif ve endüktif etkiye bağlı olarak ortaya çıkan faz hatasıdır [124]. Bu nedenle AC yüksek gerilim ölçümlerinde dirençsel gerilim bölücülerin yerine kapasitif gerilim bölücüler tercih edilir.

Şekil 206'da bir AC yüksek gerilim bölücü görülmektedir. 100 kV maksimum çalışma gerilimine sahip bu bölücünün kırmızı renkli görünen gövde kısmı C_{HV} yüksek gerilim kapasitörünü, altta görünen metalik dikdörtgen kutu kısmı ise C_{LV} alçak gerilim kapasitörünü oluşturmaktadır [127].

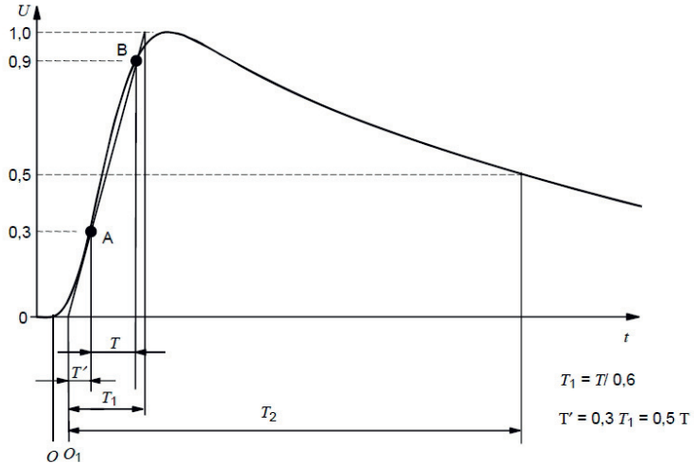


Şekil 206. TÜBİTAK UME yapımı AC yüksek gerilim bölücü

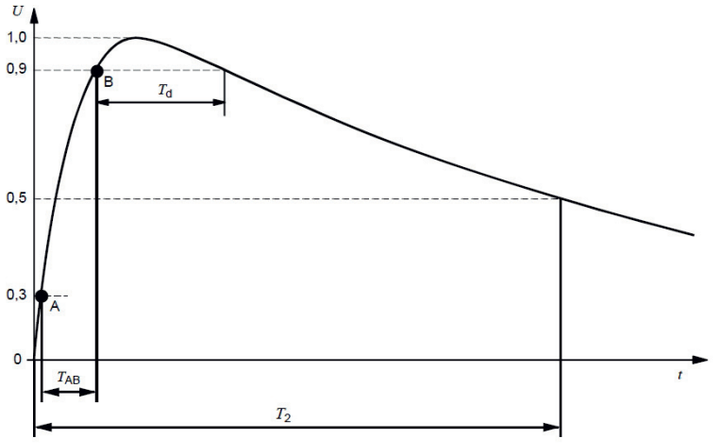
Şekil 206'da görünen AC yüksek gerilim bölücü ile birlikte Şekil 203'de görünen AC/DC tepe değer ölçüm cihazı kullanılmaktadır.

c-) Darbe Yüksek Gerilim (Impulse) Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Elektrik iletim şebekesinin herhangi bir noktasına düşebilecek bir yıldırımın etkisi IEC 60060-1 standardında Şekil 207'deki dalga formu ile tanımlanmıştır ve yıldırım darbe adını almaktadır [128]. Aynı şekilde, iletim şebekesinin herhangi bir noktasında gerçekleşecek açma/kapama hareketinin elektriksel etkisi de aynı standartta Şekil 208'deki dalga formu ile tanımlanmıştır ve anahtarlama darbe adını almaktadır [128]. Bu sebeple ilgili standartlar gereğince, her iki dalga formunun üretilerek sistemlere uygulanması ve ölçülmesi gerekmektedir. Darbe yüksek gerilim ölçümleri bu sebeple ortaya çıkmıştır.



Şekil 207. Standart yıldırım darbe dalga formu (T_1/T_2 = 1,2/50 µs)



Şekil 208. Standart anahtarlama darbe dalga formu (T_p/T_2 = 250/2500 µs)

Darbe yüksek gerilim ölçümlerinde, önceki kısımlarda anlatılan AC ve DC yüksek gerilim ölçümlerinden farklı olarak gerilim genlik değeri dışında yıldırım darbeler için yükselme (T_1), anahtarlama darbeler için tepe (T_p) ve her iki darbe ölçümleri için sırt yarı değer (T_2) zaman parametreleri de ölçülmektedir.

Darbe yüksek gerilim ölçümleri ölçüm küreleri ile olduğu gibi gerilim bölücüleriyle standartlarda belirtilen belirsizlik değerleri içerisinde rahatlıkla ölçülebilmektedir [129].

Ölçüm Küreleri İle Tepe Değer Ölçümü

Ölçüm küreleri kullanılarak sadece darbe yüksek gerilimler değil AC yüksek gerilimleri de rahatlıkla ölçülebilmektedir. En büyük dezavantajları; alınan ölçümlerin kararlılığının sağlanmasının zorluğu, ölçümlerin küre boyutlarına, ara mesafelerine ve ortam parametrelerine (sıcaklık, nem, basınç) aşırı bağımlılığı, sadece darbe genliği tepe değerinin ölçülebilmesi (zaman parametrelerinin ölçümü mümkün değildir) sayılabilir. Şekil 209'da yüksek gerilim ölçümlerinde kullanılan küresel elektrot düzeni verilmektedir.



Şekil 209. Darbe yüksek gerilim ölçümleri için küresel elektrot düzenleri

Ölçümlerin alınabilmesi için yüksek gerilim darbeleri, Şekil 209'daki küresel elektrot düzenine uygulanır. Küreler arasındaki mesafe azaltılarak uygulanan darbelerin atlama sayısının yaklaşık % 50 olduğu nokta bulunur. Bu noktadaki küreler arası mesafe, küre boyutları, ortam sıcaklık, nem ve basınç değerleri kullanılarak darbenin genlik değeri hesaplanır. Kaba bir yöntem olduğu için en iyi ihtimal ile % 3 ölçüm belirsizliği sağlanabilmektedir [129].

Darbe Yüksek Gerilim Bölücüler ile Ölçüm

Günümüzde kullanımı en yaygın olan ve en güvenilir ölçüm yöntemidir. Önceki bölümlerde anlatılan DC ve AC yüksek gerilim bölücüler ile benzer yapıdadırlar. Genel olarak iki ayrı empedans bloğunun seri bağlı olmasından oluşur. Bu empedans blokları sadece direnç (dirençsel bölücü) ya da sadece kapasitör (kapasitif bölücü) elemanlarında oluşabilmektedir. Bir diğer kullanımı kabul gören seçenek de karma tip (sönümlü kapasitif) darbe gerilim bölücülerdir.

AC ve DC yüksek gerilim bölücülerden farklı olarak darbe yüksek gerilim bölücüler aracılığı ile yapılan ölçümlerde darbe zaman parametrelerinin de ölçülmekte olduğu belirtilmişti. Bu nedenle, ölçülen darbe yüksek gerilim işaretinin bölme işlemi sonucunda sadece genliği düşürülmeli, asıl işaretin zaman parametreleri ise bire bir aktarılmalıdır. Bunun gerçekleştirilememesi durumunda ölçüm sonuçları doğru olmayacaktır. Yine önceki bölümlerde anlatılan kurallar geçerli olup empedans uyumunun sağlanması, hem bölüm oranının doğruluğu ve kararlılığı hem de zaman parametrelerinin doğru ölçülmesi açısından önemlidir [128][129]. Şekil 210'da karma tip bir darbe yüksek gerilim bölücü görülmektedir.

Diğer gerilim türleri ile kullanılan bölücüler gibi darbe yüksek gerilim bölücüler de alçak gerilim kolu üzerinden bir bağlantı kablosu ile ölçüm cihazına bağlanırlar. Empedans uyumu; bölücü, kablo ve cihaz üçlüsünün her birinin arasında sağlanmalıdır.



Şekil 210. Darbe yüksek gerilim bölücü

Darbe yüksek gerilim ölçüm sistemlerinin bir diğer önemli birimi, darbe kayıt cihazıdır. Darbe yüksek gerilim bölücünün çıkışındaki bölünmüş darbe işaretinin genlik ve zaman parametrelerinin ölçümünü yaparak bir ekran aracılığı ile kullanıcıya sunarlar. Şekil 211'de 12 bit dikey çözünürlüğüne sahip 200 MS/s örnekleme hızında bir darbe yüksek gerilim kaydedici görülmektedir.



Şekil 211. Darbe yüksek gerilim sayısal kaydedicisi

7.4.3 DİRENÇ

7.4.3.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi Ve Dağıtımı

Direncin Tanımının Tarihçesi

Elektriksel direnç birimi, türetilmiş bir birimdir ve "Ohm" olarak ifade edilir. Uluslararası kabul edilmiş olan temel birimler üzerinden ifade edildiğinde Volt/Amper'e karşılık gelen $(m^2 \cdot kg)/(sn^3 \cdot A^2)$ şeklindedir. İsmini 1787 – 1854 yıllarında yaşamış olan Georg Simon OHM'dan alır. Elektrik birimi olarak "Ohm" ifadesi ilk defa 1861 yılında farklı uzunluklardaki telgraf tellerine karşılık gelen direnç standartlarında kullanılmaya başlandı [130].

1833 yılında Karl Friedrich Gauss, bütün elektriksel manyetik birimlerin, mekaniksel birimler cinsinden (metre, kilogram, saniye) ifade edilebileceğini gösterdi. Bundan yirmi yıl sonra Wilhelm Weber, elektriksel büyüklükler sistemini mekaniksel büyüklüklerle ifade etti. Bu sayede direnç biriminin "bilimsel" olarak tanımlanmasını eşitlik haline getirmek mümkün olmuştur.

1861 yılında Manchester'da İngiliz Bilimsel İlerleme Cemiyeti yaptığı bir toplantıda, "elektriksel direnç birimi" raporunu oluşturmak için komisyon kurdu. 1864 yılında bu komisyon, mutlak büyüklüğü Metre-Gram-Saniye (MGS) Birimler Sistemine dayandırılan direncin "İngiliz Cemiyeti Birimi"ni oluşturdu. Ancak direncin MGS birimi büyüklüğünde çalıştıklarında, telgraf mühendislerinin ihtiyaçlarını karşılamak için oldukça küçük olduğu görüldü. Pratikteki ihtiyacı karşılamak amacıyla kullanılan direnç birimi Ohm'un mutlak direnç birimi MGS'nin 10^7 katı kadar fazla olması önerildi.

Komisyon aynı zamanda bu büyüklük için telden yapılmış bir standart direnç hazırlandı.

1868 yılında İngiliz Cemiyeti "elektriksel ve dinamik birimlerin bilimsel terminolojisi ve seçimi için" başka bir komisyon oluşturdu. Bu komisyon 1872 yılında "Direncin İngiliz Cemiyeti Birimi" olan ismini "Ohm" olarak değiştirmeyi önerdi.

Paris'te 1881 yılında düzenlenen Birinci Uluslararası Elektrikçiler Konferansı'nda, İngiliz Cemiyeti'nin Ohm tanımı, "tekrar üretilebilir standartlar" olarak kabul edildi. Bu tip büyüklükler, laboratuvarlarda oluşturulması oldukça kolay olduğundan "pratik büyüklükler" olarak adlandırıldı.

İlerleyen yıllarda, çeşitli ülkelerde birbirinden farklı on beş değişik direnç standardının kullanılmakta olduğu görüldü. Bunlardan biri de, 1 km uzunluğunda ve 4 mm çapında demirden yapılmış telgraf telinin gösterdiği direnç standardı idi ve bu tel senelerce direnç prototipi olarak kullanıldı.

1893 yılında Chicago'da yapılan Uluslararası Elektrik Kongresi'nde, "tekrar üretilebilir Ohm" isminin "Uluslararası Ohm" olarak değiştirilmesine karar verildi. Ohm, 0 °C sıcaklıkta 1 mm^2 kesit alanı olan civa sütununun, 106,3 cm yükseklikte 14,4521 g ağırlığında sahip olduğu direnç olarak tekrar tanımlandı.

Direncin Güncel Tanımı

Elektriksel birimler ile mekanik birimler arasında uyum sağlamak için "mutlak" birimler sistemi kabul edilmiş ancak ilerleyen yıllarda birçok farklı birimler sisteminin ortaya çıktığı görülmüş ve bunu ortadan kaldırıp uluslararası alanda birliktelik sağlamak için 1960 yılında "Uluslararası Birimler Sistemi (SI- International System of Units) kabul edilmiştir.

SI birimleri cinsinden Ohm'un tanımlanmasında uzunluk - metre (m), kütle - kilogram (kg), zaman - saniye (s), akım - amper (A) yer alır. Ohm'un (Ω) bu birimlerle ifadesi aşağıdaki şekilde yapılmıştır;

$$1\ \Omega = 1\ m^2\ kg\ s^{-3}\ A^2 \qquad (66)$$

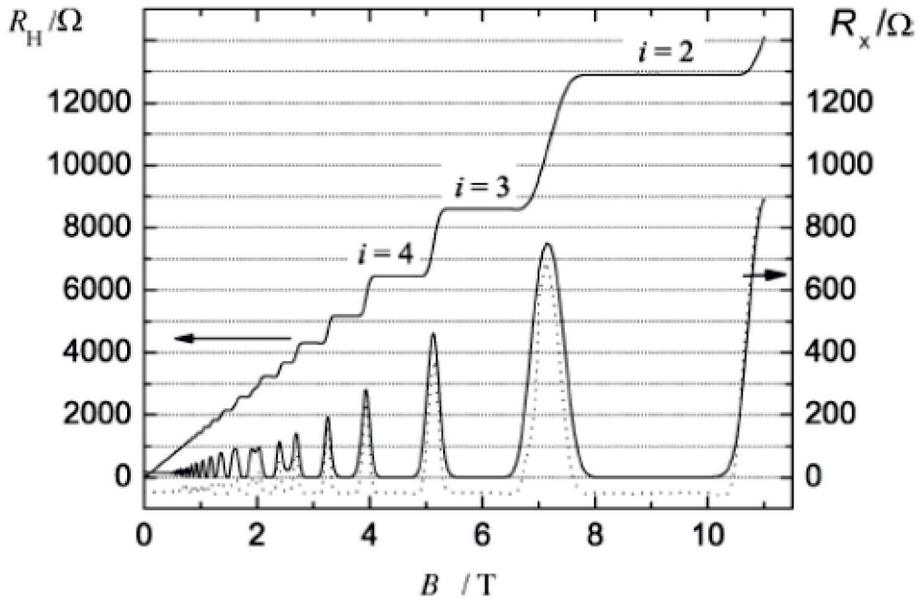
Ohm biriminin birincil seviyede elde edilmesi için günümüzde iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

- Hesaplanabilir kapasitans standardı (Kros kapasitör)
- Kuantum Hall direnci

Thompson-Lampard teoremine göre Ohm'un elde edilmesi yöntemi "Kapasitans" bölümünde detaylı olarak anlatılmaktadır.

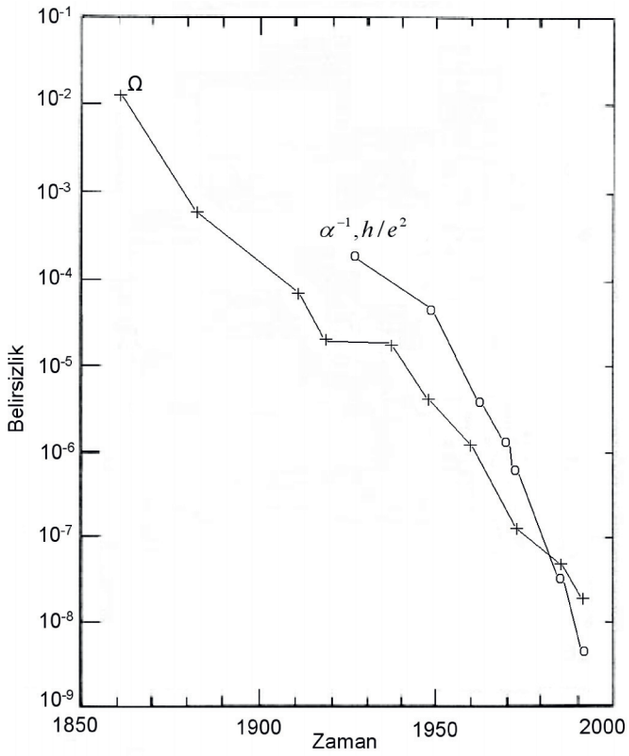
Kuantum Hall (KH) direnci aslında değeri milyarda 5'ten daha iyi kararlılıkla belirlenebilen bir DC direnç standardıdır. Değeri de Von Klitzing ($R_{K\text{-}90}$) sabiti tarafından belirlenir [131]. Von Klitzing sabiti $R_{K\text{-}90} = h / (e^2 \times i) = 25812{,}807\ \Omega$ (i = 1) olarak ifade edildiğinden KH Sistemi kullanılarak elde edilen direnç değeri hangi "i" değerinde bir başka deyişle KH numunesinin kaç numaralı platosunda bulunulduğuna bağlıdır.

Örneğin i=2 platosunda KH direnci değeri 12906,4035 Ω değerini alır. Bu da KH numunesinin üzerine ne kadar manyetik alan uygulandığına bağlıdır. Şekil 212'de görüldüğü gibi örneğin KH numunesine (8-10) Tesla aralığında bir manyetik alan uygulandığında KH direnç değeri i=2 platosuna, (5-7) Tesla aralığında manyetik alan uygulandığında ise i=3 platosuna oturmaktadır.



Şekil 212. Kuantum Hall Sisteminde platolar

Şekil 213'deki grafikten de görülebileceği gibi direnç birimi 1860 yılında 10^{-2} hassasiyetle belirlenebilirken, 1900'lü yılların başlarında 10^{-4} seviyelerinde belirlendi. 1960'lı yıllarda 10^{-6} seviyelerine düşmüş olan direnç ölçüm belirsizliği, günümüze gelindiğinde Kuantum Hall ile birlikte direnç birimi elde edilme belirsizliği yüz milyonda bir değerinin altına da düştü.



Şekil 213. Yıllara göre, deneysel olarak 1 Ohm direncinin ve (h/e^2) ifadesinin elde edilme belirsizliklerinin değişimi

Kuantum Hall Etkisi ile Direncin Elde Edilmesi

Kuantum Hall Etkisi, Mosfet veya hetero yapılardaki yarıiletken malzemelerde gözlenebilir. Bu etkiyi gözlemleyebilmek için malzemeler 4,2 K veya daha düşük sıcaklıklara soğutulur ve üzerine 1 Tesla'dan daha büyük manyetik alan uygulanır. Bu durumda malzemenin üzerinden 100 μA'den daha düşük bir akım geçirildiğinde, sabit Hall geriliminin elde edildiği platolar diğer bir deyişle kuantum basamakları oluşur. Bu platolardan yarıiletken cihazın tipine bağlı olarak, kapı (gate) geriliminin veya manyetik alanın bir fonksiyonu olarak Hall direnci elde edilir. Oluşan platolar Şekil 212'de gösterilmiştir.

Hall direnci R_H ile gösterilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir;

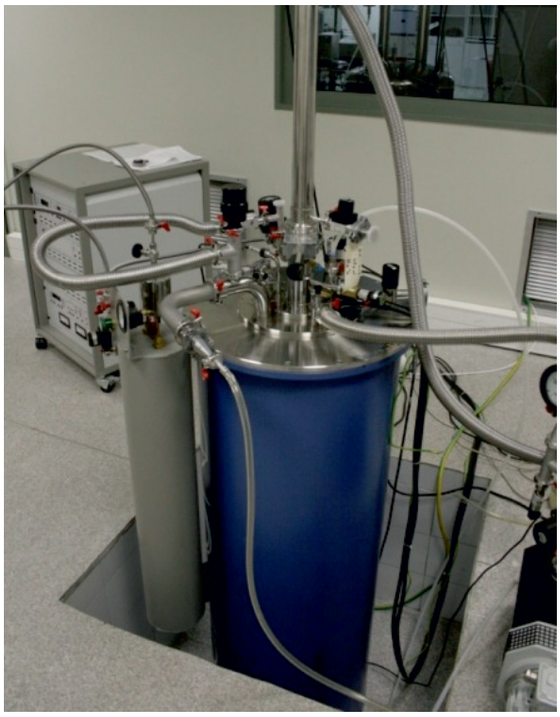
$$R_H(I) = \frac{V_H}{I} = \frac{R_K}{I} \qquad (67)$$

burada V_H Hall gerilimi, I malzeme üzerinden akan akım, R_K von Klitzing sabitidir. Kuantum Hall Etkisi ile direnç değeri 0,001 ppm seviyesinde bir doğrulukla elde edilir.

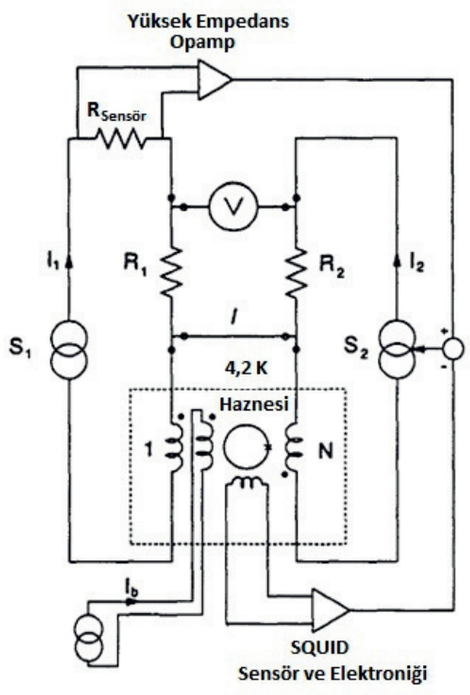
KH direnç sistemi oldukça karmaşık bir sistemdir. Bunun birden çok nedeni vardır. En önemli neden aynı sistem içerisinde faklı koşullarda bulunması gereken sistem elemanlarının olmasıdır. Örneğin, sistem içerisinde yüksek manyetik alanın üretilmesinden sorumlu manyetik alan üreteci sıvı helyum içerisinde 4,2 K (-268,96 °C) sıcaklığında tutulurken, en kararlı direnç standardını oluşturabilmek için KH numunesinin 0,3 K (-272,86 °C) sıcaklığında tutulması gereklidir. Bu yüzden manyetik alan üreteci sıvı helyum içerisinde tutulurken KH numunesi, helyum elementinin bir izotopu olan sıvı He^3 içerisinde tutulur. Sıcaklık, sıvı He^3 üzerindeki basıncın azaltılması ile 0,3 K değerine düşürülür.

Çok iyi kararlılığa sahip bir direnç olan KH direncinin ölçülebilmesi için en az aynı kararlılıkla ölçüm alabilen ölçüm sistemlerine ihtiyaç vardır. Sonraki bölümlerde bu ölçüm sistemleri incelenecektir.

TÜBİTAK UME'de ulusal direnç birimi Kuantum Hall direnci referans alınarak oluşturulur.



Şekil 214. UME Kuantum Hall Sistemi



Şekil 215. Düşük sıcaklık akım karşılaştırma köprüsü devre şeması

Direncin Referans Direnç Standartlarına Aktarılması

i) Düşük Sıcaklıkta Çalışan Direnç Köprüsü

Düşük sıcaklık akım karşılaştırıcı (CCC-Cryogenic Current Comparator), iki doğru akımın oranlarını yüksek doğrulukta ölçmek için kullanılır. Bu ölçümü gerçekleştirebilmek için CCC'nin süperiletken ortamda çalışması gerekir ve bunun için de düşük sıcaklıkta-sıvı Helyum (4,2 K) sıcaklığında olması gereklidir. Kapalı bir alan boyunca oluşan manyetik akının integralinin bu çevrim boyunca akan akıma eşit olduğu durumu ifade eden Amper yasaları ve Meissner etkisi olarak bilinen süperiletken malzemeden dışarı itilen manyetik akı özellikleri CCC'nin çalışma prensibini oluşturur.

Şekil 215'de CCC direnç köprüsünün devre şeması gösterilmektedir. Ölçülecek olan dirençlerin üzerinden akan akımlar CCC'deki sarımlardan geçer ve akım oranındaki herhangi bir hata karşılaştırıcıda net bir akı meydana getirir. Bu akı süperiletken detektör (SQUID-Superconducting Quantum Interference Device) tarafından algılanır. Algılanan hata sinyali yardımcı kaynak olan S_2'ye geri besleme olarak gönderilir ve böylece geri besleme döngüsü kazancıyla akım oranındaki hata azaltılır.

Sıfır sezicinin çıkışı, köprünün yardımcı sarımlarında akan ve köprüyü dengeye getiren I_b akımını oluşturmak için kullanılır. Dirençteki potansiyel düşmeleri kayıt eden voltmetre (DVM) ile I_b akımı sezilir. Böylece DVM okuması bize direnç oranının nominal değerden ne kadar uzaklaştığını verir [132][133].

Bu sistemle 1:129 oranı kullanarak i=2 platosunda elde edilen yaklaşık 12,906 kΩ direnç değerine sahip KH direncinin değeri en kararlı referans dirençler olan 100 Ω direnç değerine aktarılır.

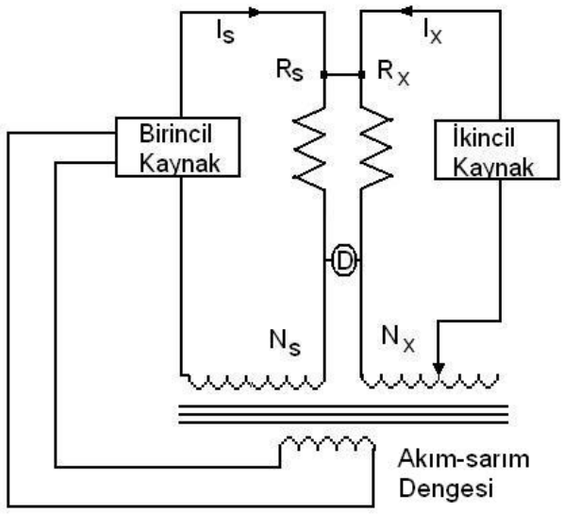
KH direnci ile karşılaştırılan ve değeri belirlenen 100 Ω referans standart direnç, diğer referans direnç standartlarıyla CCC'nin 1:1,1:10 ve 1:100 oranları kullanılarak karşılaştırılır. Bu şekilde 1 Ω - 10 kΩ aralığındaki dirençlerin değerleri 10^{-8}'ler seviyesinde belirlenir.

ii) Oda Sıcaklığında Çalışan Direnç Köprüleri

Akım Karşılaştırma Köprüleri

CCC köprüleri DC direnç karşılaştırması yapabilen en yüksek doğruluğa sahip köprülerdir. Bu köprülerin ardından CC (current comparator) denilen oda sıcaklığında akım karşılaştırma yöntemi ile DC direnç karşılaştıran köprüler gelir. CCC köprüleri 10^{-9} seviyelerinde ölçüm alan köprülerken CC köprüleri ile 10^{-8} - 10^{-7} seviyelerinde ölçüm alınabilmektedir.

CC köprüleri CCC ile değerleri belirlenen referans direnç değerlerinin çalışma standartlarına aktarılması için kullanılabilir. Düşük sıcaklıklarda çalışan CCC'lerin çalıştırma maliyetleri çok yüksek olduğundan CC köprüleri birçok metroloji laboratuvarında en yüksek doğruluğa sahip köprülerdir.



Şekil 216. Akım karşılaştırma köprüsü devre şeması

Akım karşılaştırma köprülerinin çalışma prensibi Şekil 216'da görülmektedir. CCC'ler ile benzerlik gösterir. CCC'lerde akım sezme işlemi SQUID kullanılarak yapılırken CC'lerde akım sezme işlemi toroidal nüvelere sarılan akım karşılaştırıcı ile yapılır.

Toroidal nüvelere yapılan sarımların DC akımda kullanılmaları şöyle gerçekleşir: Gerçekte transformatörlere DC akım uygulanmaz. Bu sistemde akım karşılaştırıcı 700 Hz civarında bir frekansa sahip AC akımla sürülür. Dirençlerin üzerine akan akımların farklı olması dolayısıyla algılama transformatörüne uygulanan DC akım 700 Hz'lik sinyalin ikinci harmoniğinin genliğini değiştirir. Böylece DC akım sezme işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Burada dedektör denge durumuna geldiğinde

$$I_s \times R_s = I_x \times R_x \quad (68)$$

Eşitliği elde edilir. Akım- sarım dengesini gösteren detektörde sıfır görüldüğünde ise;

$$I_s \times N_s = I_x \times N_x \quad (69)$$

Eşitliği elde edilir. Eşitlik (68) ve (69) kullanılarak;

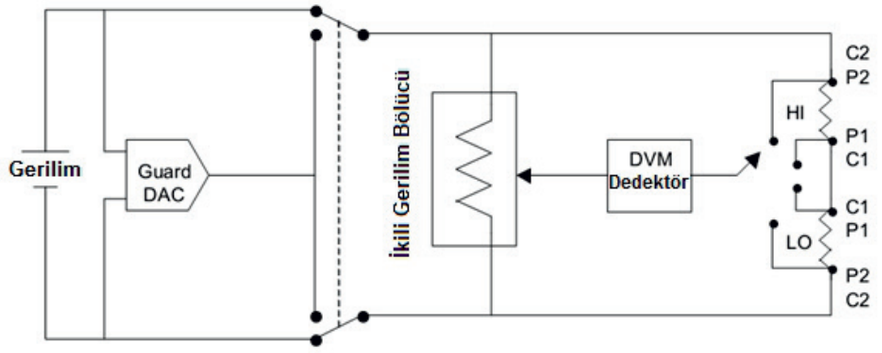
$$\frac{R_X}{R_S} = \frac{N_X}{N_S} \quad (70)$$

Bu ifade direnç – oran köprüsünün temelini oluşturur.

Bu tip köprülerin çalışma aralığı genelde 1 Ω - 10 kΩ'dur. 1 Ω'un altındaki direnç değerlerini ölçmek için aralık genişletici (Range Extender – RE) ve yüksek akım kaynağı kullanılması gerekir. Çünkü 1 Ω'un altındaki direnç değerlerini ölçmek için, ölçülecek olan direncin üzerine yüksek akım uygulanması gerekir. Köprü tek başına kullanıldığında maksimum 150 mA gibi bir değer uygulanabilirken, RE ve yüksek akım kaynağı ile 100 A veya daha fazla akım uygulamak mümkün olur.

Gerilim Bölücü Köprüleri

10 kΩ üzerindeki direnç değerlerini ölçmek için ise potansiyometrik yöntemi kullanan ikili gerilim bölücü (BVD-Binary Voltage Divider) kullanılır (Şekil 217). Direnç ölçümü yapmak için referans direnç ve bilinmeyen direnç (DUT-Device Under Test) olmak üzere iki adet direnç birbirine seri olarak bağlanır ve üzerlerinden aynı gerilim geçirilir.



Şekil 217. BVD ile yapılan ölçüm köprüsü

Gerilim değeri direnç oranlarına bölünür ve $P_2(R_1)$, $P_1(R_1)$, $P_1(R_2)$ ve $P_2(R_2)$ noktalarında V_1, V_2, V_3, V_4 gerilimleri ölçülür. Ölçülen gerilim BVD'den gelen gerilim ile dengelenir ve yüksek çözünürlüklü bir DVM burada sıfır sezici olarak kullanılır.

Her iki dirençten geçen akım aynı olduğundan dirençler üzerinde dirençlerin değerleri ile orantılı gerilim oluşur. Kaynak geriliminin ölçüm boyunca değişmediği kabul edilir. Bilinmeyen direnç değeri ölçülen gerilim oranları ve referans direncin değeri kullanılarak hesaplanır [134].

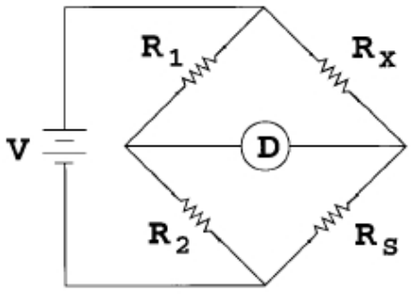
$$\text{Oran} = \frac{R_X}{R_S} = (V_1 - V_2)/(V_3 - V_4) \quad (71)$$

Dirençler köprüye dört uç ile bağlıdır. Eğer dirençler iki uçlu yapıya sahipse P_1, C_1 ve P_2, C_2 uçları birbirine bağlanarak ölçüm gerçekleştirilir.

Bu tip köprülerle genelde 10 kΩ - 1 GΩ aralığındaki dirençler ölçülür. 100 MΩ ve üzerindeki yüksek değerli direnç ölçümlerinde Wheatstone köprüsü kullanılır.

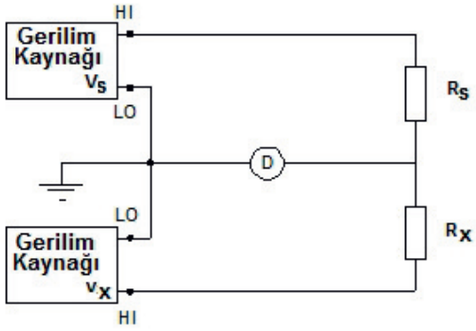
Wheatstone Köprüsü

Şekil 218'de klasik bir Wheatstone köprüsü görülür. Bu devrede R_1 ve R_2 dirençlerinden bir tanesi veya ikisi birden ayarlanarak köprüdeki dedektörün sıfır okuduğu noktada köprü dengeye getirilir. Ancak bu sistemde bir direnç ölçebilmek için en azından bir tane ayarlanabilir direnç ve iki tane de sabit direnç gerekir. Bu durum ise pratikte her zaman mümkün olmamaktadır. Ayrıca sabit kolda kullanılan dirençlerin ölçüm sistemi üzerinde yükleme etkileri olabilmekte, bu ise ölçüm belirsizliğinin düşürülmesini engellemektedir.



Şekil 218. Klasik Wheatstone Köprüsü

Alternatif olarak köprünün sabit kolundaki R_1 ve R_2 dirençleri yerine iki adet değeri ayarlanabilir DC gerilim kaynağı kullanılarak ölçüm köprüsü Şekil 219'da görüldüğü gibi sadeleştirilebilir [134]. Böylelikle birden fazla direnç kullanmadan sadece değeri bilinen bir tane referans direnç kullanılarak bilinmeyen direncin değeri hesaplanabilir. Bu yöntemin bir diğer avantajı ise kullanılan ayarlanabilir kaynakların çıkış empedanslarının düşük değerli olmasıdır. Böylelikle kaynakların ölçüm sistemi üzerine herhangi bir empedans etkisi olmayacaktır. Bu ise ölçümlerin daha düşük belirsizlikle gerçekleştirilmesine olanak tanır.



Şekil 219. Değiştirilmiş Wheatstone Köprüsü

Şekil 219'da görüldüğü üzere klasik Wheatstone köprüsünden farklı olarak referans koldaki dirençler yerine değeri ayarlanabilen, kararlı iki adet gerilim kaynağı kullanılmaktadır. Köprüyü dengelemek için bu kaynaklardan birinin veya her ikisinin de değeri değiştirilir.

Köprüde, direnç değerine bağlı olarak akım veya gerilim algılayan dedektörler kullanılabilir. 1 TΩ üzerindeki dirençlerde gerilim değerini algılamak, gerilim dedektörünün (multimetre) giriş direnci 10 GΩ civarında olduğu için, iyi sonuç vermediğinden, giriş direnci 10 TΩ'un üzerinde olan, akım algılayan elektrometreler kullanmak daha uygun olmaktadır. Köprü dengeye geldiğinde bilinmeyen direncin değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$R_X = \left(\frac{V_X}{V_S}\right) \times R_S \qquad (72)$$

Buradaki R_x bilinmeyen direnci, R_s referans direnci, V_x bilinmeyen direnç üzerine uygulanan gerilimi ve V_s ise referans direnç üzerine uygulanan gerilimi gösterir.

Gerilim kaynaklarının değerlerini ölçtükten sonra köprünün halen dengede olup olmadığının ölçülmesi gereklidir. Yüksek değerli dirençler aynı zamanda birer kapasitör gibi davrandığından yüklenebilir ve köprünün denge noktası değişebilir. Bu problemi ortadan kaldırmak için dirençler ilk olarak toprak noktasına bağlanır ve denge konumu tekrar kontrol edilir.

Bu gibi sistemlerde dirençler yer değiştirilir ve okunan bu iki değerin ortalaması ölçüm sonucu olarak alınır. Bu şekilde köprüde kaçak akımlarından dolayı oluşabilecek hata azaltılmış olur.

Dirençler ölçümler sırasında tiplerine göre eğer yağ tipi ise sıcaklık kontrollü yağ banyosunda, hava tipi ise nem ve sıcaklık kontrolü olan hava banyolarında muhafaza edilirler. Sıcaklık her iki tip direnç ölçümü için oldukça önemli bir parametredir. Nem ise, yalıtkan malzeme üzerinde iletken bir tabaka oluşturacağından kaçak akım oluşmaması için yüksek değerli dirençlerin ölçümünde önemlidir.

7.4.3.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Kullanılan Direnç Standartları ve Tipleri

Birinci seviye laboratuvarlarda, metrolojik amaçlı olarak kullanılmakta olan başlıca 4 tip standart direnç mevcuttur. Bunlar; Reichsanstalt (Almanya, 1890'lı yıllar), Rosa (Amerika, NBS, 1910), Thomas (1931) ve ESI SR104 isimli standart dirençlerdir [135]

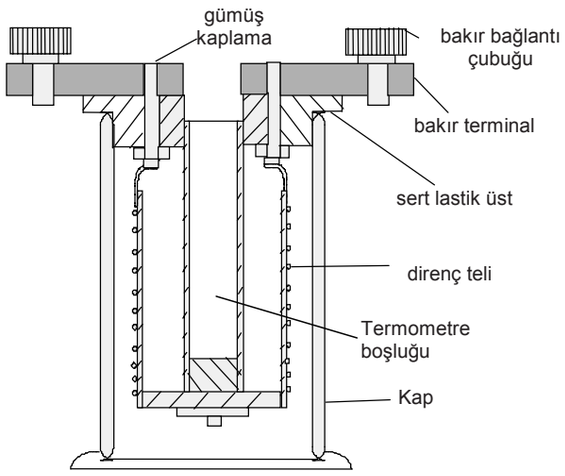
Yukarıda adı geçen direnç tiplerinden bazıları yağ banyolarında muhafaza edilmek üzere tasarlanmışlardır. Özellikle 0,1 Ω'dan daha düşük değerli dirençlerin yapımında kullanılan (Reichsanstalt tipi dirençlerde) direnç teli, silindirik bir tüpün üzerine sarılır. Direnç yağın içerisine konulduğunda direnç teli doğrudan yağ ile temas halindedir. Düşük değerli dirençlerin ölçümlerinde yüksek akım değerleri kullanılır ve bu akım değeri direnç üzerinde kendiliğinden ısınma etkisi (self heating) yaratır. Bu nedenle, doğrudan yağ ile temas, direnç telinin soğutulması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 220. Reichsanstalt tipi dirençler

Rosa tipi dirençler aynı zamanda NBS (ABD Metroloji Enstitüsü NIST'in o zamanki adı) tipi dirençler olarak da tanınırlar. Bu dirençlerde, direnç teli ipek izolasyonlu pirinç levha üzerine sarılmıştır ve içi yağ ile doldurulmuş olan ikinci bir metal kap içinde bulunmaktadır. Metal kap, iyi kalitedeki hafif mineral yağ ile doldurulur. Yağ kullanılmasının amacı, akım geçişi sonucu oluşan ısınmayı azaltmak, dolayısıyla direncin akım taşıma kapasitesini artmaktır. Direnç telindeki ısınmayı en aza indirmek için direncin bulunduğu ortam sıcaklığını mümkün olduğunca sabit tutmak gerekir. Bu da ancak sıcaklık kontrollü yağ banyoları ile mümkündür. Birinci seviye ölçümlerde kullanılan dirençler genellikle yağ banyosunda muhafaza edilmek üzere tasarlanmışlardır. Bunlar sürekli olarak ya da ölçüm süresince ± 0,005 °C kararlılıkta sıcaklık kontrollü yağ banyosunda bulundurulurlar. Bu tip dirençlerin orta kısmında, içerisine termometre yerleştirilebilecek şekilde tasarlanmış olan ve direnç standardının ölçüm esnasındaki sıcaklığını

ölçmeye yardımcı olacak, termometre boşluğu bulunur. Şekil 221'de bu dirençlerin yapısı gösterilmiştir. UME'de bu tip dirençler çalışma standartları olarak muhafaza edilmektedir.



Şekil 221. Rosa tipi standart direncin yapısı



Şekil 222. SR104 10 kΩ direnç standardı

Yüksek kararlılığa sahip olacak şekilde tasarlanmış olan Thomas tipi dirençler ise, özellikle 1 Ω değerinde kullanılır. Direnç teli, iç içe geçmiş iki silindirik tüpten iç kısımda bulunan silindirin üzerine sarılır ve iki tüpün arası nemsiz hava ile doldurularak dış ortamla ilişkisi kesilecek şekilde kapatılır. Direnç yağın içindeyken, yağ sadece direncin iç içe geçmiş olan kaplarına temas etmekte ancak telin kendisi ile temas etmemektedir. Bu yüzden de ısı transferi Reichsanstalt tipinde olduğu kadar iyi değildir ve bu dirençlerin sıcaklık katsayıları daha yüksektir. Bu yüzden sıcaklığı çok iyi kontrol edilen yağ banyolarında ölçülmeleri bir zorunluluktur. Buna karşılık uzun dönem kararlılıkları çok daha iyidir. UME'de 1 Ω değerinin muhafazasında ve düşük değerli dirençlerin izlenebilirliklerinin sağlanmasında referans standart olarak bu direnç standartları kullanılır.

Electro Scientific Industries (ESI) tarafından üretilmiş SR104 dirençler, çok yaygın olarak kullanılan 10 kΩ değerindeki dirençlerdir. Bu dirençler havada ölçülmek üzere tasarlanırlar (Şekil 222) ve laboratuvar dışında da kullanıma uygundurlar. Bu tip standartların içinde, özel olarak yaşlandırılma işlemine tabi tutulmuş ve seçilmiş, düşük sıcaklık katsayılarına sahip EvanOhm'dan yapılmış dirençler bulunur. Bu dirençler, dış ortamdan izole edilmiş ve silikon yağı ile doldurulmuş kap içine yerleştirilirler. Kararlılıkları yüksek ve sıcaklık katsayıları oldukça düşük dirençlerdir. Kabın içerisine yerleştirilen sıcaklık sensörünün ölçülmesi sureti ile direncin o anki sıcaklıkta aldığı değer hesaplanabilir. UME'de 10 kΩ değerinin muhafazasında ve yüksek değerli direnç standartlara 100 Ω'dan izlenebilirliği aktarmakta, referans standart olarak bu dirençler kullanılır.

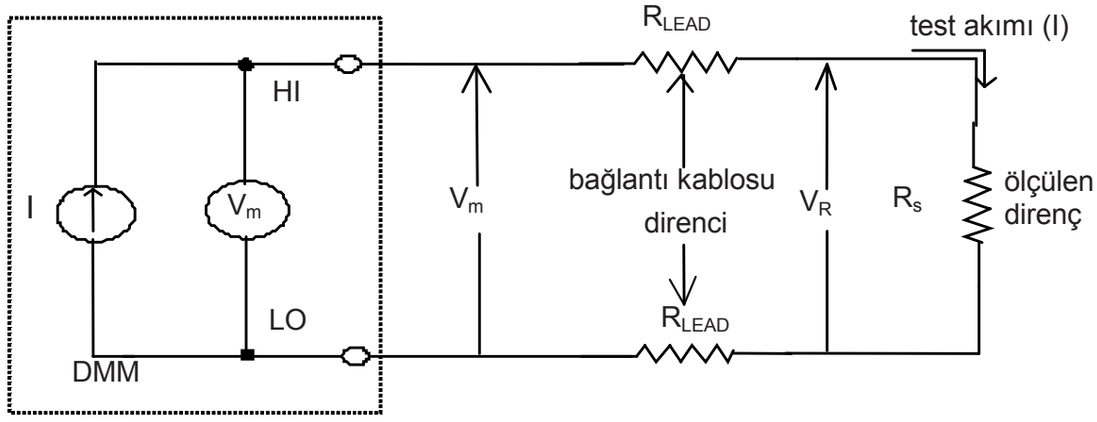
Direnç Ölçüm Yöntemleri

Direnç standartlarının ölçümlerinde, iki uçlu ve dört uçlu olmak üzere iki tip bağlantı şekli mevcuttur. Düşük değerleri direnç ölçümlerinde, bağlantı tellerinden gelen direnç etkisini azaltmak için dört uçlu ölçüm yönteminin kullanılması uygun olmaktadır. Dört uçlu bağlantı 100 kΩ'dan küçük ve iki uçlu bağlantı ise 1 MΩ'dan büyük dirençler için uygundur.

i) İki Uçlu Direnç Ölçümü

Değeri 100 kΩ'dan büyük ya da eşit olan dirençlerin ölçümlerinde, genellikle Şekil 223'de görülen iki uçlu bağlantı yöntemi kullanılır. Ancak çok yüksek doğruluk gerektiren ölçümlerde, yüksek değerli dirençler için de dört uçlu ölçüm yöntemi kullanılabilir. Ölçülecek olan R_S direnci ve bağlantı kabloları üzerinden test akımı geçirilir. Direnç ölçer, bu bağlantı kablolarının dirençleri üzerinden geçen gerilimi ölçer ve buna bağlı olarak direnç değerini hesaplar.

Düşük değerli direnç ölçümlerinde, iki uçlu ölçüm yönteminin kullanılması sırasında ortaya çıkan temel problem, bağlantı kablolarının sahip olduğu R_{LEAD} direncidir. Uygulanan I akımı, bağlantı kabloları üzerinde küçük, fakat belirgin bir gerilim düşüşüne sebep olur. Multimetre tarafından okunan V_M gerilimi, R_S direnci üzerine düşen V_R gerilimine tam olarak eşit değildir ve buradan kaynaklanan hata göz ardı edilemez. Tipik bir bağlantı kablosunun direnç değeri 0,01 Ω ile 1 Ω arasındadır.



Şekil 223. İki uçlu direnç ölçüm yöntemi

Ölçülen direnç değeri, R_S yerine "$R_S+(2\times R_{LEAD})$'dir. Ölçüm hatası, bağlantı kablolarının ve konektörlerinin direncine bağlı olarak değişir. Örneğin 1 Ω değerinde bir direnci, 0,1 Ω dirence sahip bağlantı kabloları ile ölçmek % 10 hata yapılmasına neden olur. Bu hata değeri 100 kΩ için 1 ppm'dir.

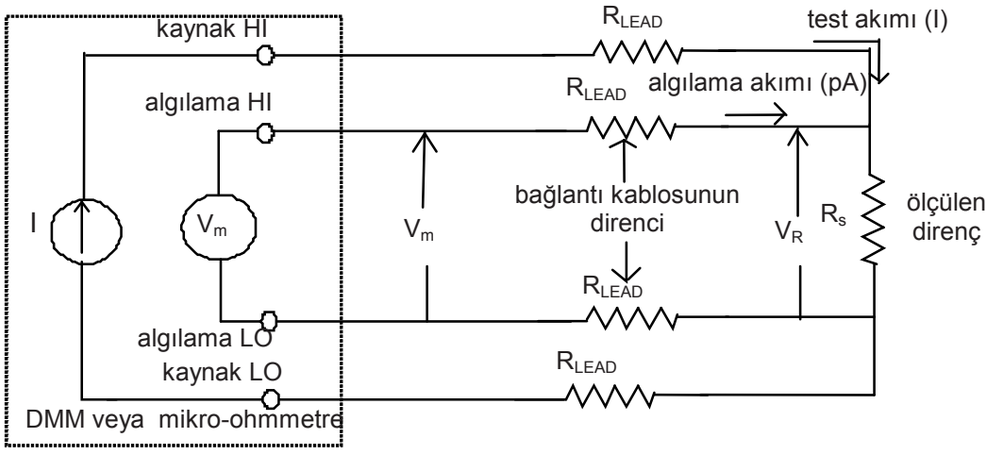
ii) Dört Uçlu Direnç Ölçümü

İki uçlu ölçümlerde kablo dirençlerinin de ölçüm sonucuna dahil olması 100 kΩ ve altındaki direnç değerleri için önemli bir sorundur. Bu etkinin giderilmesi için dört-uçlu ölçüm tekniği geliştirilmiştir.

Dört uçlu direnç ölçümün için bağlantılar Şekil 224'te gösterilir. Bu yöntemde ölçülecek olan dirence dört uçla bağlantı yapılır. Dıştaki uçlar akım uçları, içteki uçlar gerilim uçlarıdır. Ölçümü yapan direnç ölçer akım uçlarında dirence akım uygular. Direncin üzerine düşen gerilimi ise gerilim uçlarından okur. Gerilim okuyan cihazların giriş direnci teoride sonsuz pratikte 10 GΩ'dan büyük olduğu için bu koldan akım akmaz. Bu nedenle de gerilim kollarındaki bağlantı kablolarının dirençleri bir gerilim düşümüne neden olmaz, yalnız ölçülen direnç üzerindeki gerilim ölçülür.

$$R_S = \frac{V_R}{I} \tag{73}$$

Gerilim ve akım kollarının direnç üzerinde birleştiği noktalar tanım noktaları olarak adlandırılır. Yüksek değerli direnç ölçümlerinde, bağlantı kablosunun direnci büyük bir katkı yapmayacağından, iki uçlu ölçüm yöntemi kullanılabilir. Ancak, yüksek değerli dirençlerin ölçümünde tam bir kesinlik aranıyorsa, dört uçlu bağlantı kullanılması uygundur [133].



Şekil 224. Dört uçlu direnç ölçüm yöntemi

Düşük Akım Ölçümleri

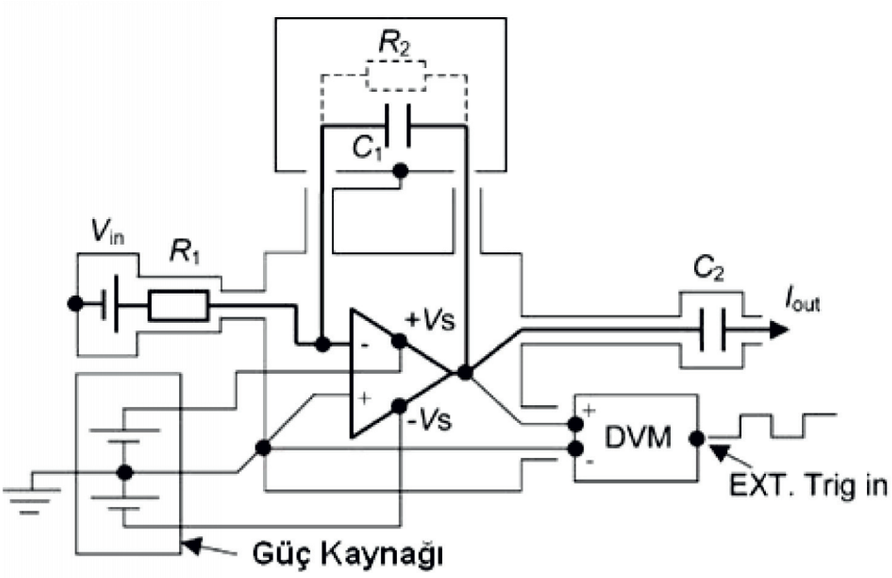
1 µA - 1 fA aralığındaki düşük akım ölçümlerini gerçekleştirebilmek için öncelikle kararlı ve doğru bir akım elde etmek gerekir. Pikoamper seviyelerindeki akım ölçümleri birçok laboratuvarda gerilim – direnç yöntemi ile yapılmaktaydı. Bu yöntemde kararlı bir V gerilimi yine kararlı bir R direnci üzerinden geçirilerek klasik Ohm kanunu ile I akımı hesaplanır. Bu metodun doğruluğu, kullanılan direncin doğruluğu ve kaynağın kararlılığına bağlıdır. Bu yöntemle yapılan çalışmada elde edilen genişletilmiş belirsizlik değerleri 1 pA için 3800 ppm, 10 pA için 480 ppm ve 100 pA için 150 ppm olmuştur [136][137]. Burada 1/f gürültüsü ve kalibrasyonda kullanılan direncin ölçüm belirsizliği sınırlar. Daha düşük akımlara inmek için bu yöntemin dışında alternatif yöntemler kullanılır.

Yapılan çalışmalarda 1 nA ve üzeri akımlar için, yukarıda bahsedilen gerilim-direnç yönteminin daha küçük akımlar için uygulanmasının hataları artırdığı görülmüştür. Bu nedenle 1 nA'den küçük akımlar için lineer gerilim rampası ve çok düşük kayıplı kapasitör kullanarak yeni bir teknik geliştirilmiştir [138].

Bu yöntem çok düşük kayıp faktörüne sahip bir kapasitörün üzerine değişen bir gerilim uygulayıp oluşan akımı ölçme prensibine dayanır. Bir kapasitör üzerine uygulanan değişken gerilim kapasitör üzerine bir akıma neden olur.

$$I = C\left(\frac{dV}{dt}\right) \tag{74}$$

Şekil 225'te düşük akım elde etmek için tasarlanıp kullanılan bir sistemin genel devresi yer almaktadır.



Şekil 225. Kullanılan sistemin şematik gösterimi

Ölçüm sisteminde kullanılan düşük kayıplı azot-dielektrikli kapasitörün değeri 1 nF veya daha düşüktür. Ayrıca yüksek kalitedeki azot-dielektrik kapasitörün DC kapasitansı, 1 kHz civarında ölçüm frekansındaki değerine 10 μF/F'lik bir değer içinde eşit olduğu varsayılır. Çünkü kapasitörün esas AC/DC bağımlılığı elektrotlar arasındaki dielektrikten kaynaklanır. Eşitlik (74) bize, ideal akım elde etmek için ideal gerilim rampası ve değeri iyi bilinen kapasitöre gereksinim olduğunu ifade eder. Bu sistemde rampa üretecinin çıkış gerilimi, zaman ile tetiklenen geniş ölçüm bölgesine sahip kalibreli bir voltmetre ile ölçülür. Ardışık gerilim okumalarını birbirinden çıkartarak elde edilen ΔV'yi tetikleme aralığına (Δt) bölerek rampa oranı $\Delta V/\Delta t$ elde edilir [139]. Bu yöntemle 100 fA akımı % 0,5 belirsizlikle ölçülebilir.

Ancak bu sistemde de bir takım sınırlamalar mevcuttur. Buradaki en etkin faktör gerilim rampasının *V(t)* doğrusallığının C_1'e paralel olan kaçak direnç R_2 tarafından sınırlanmasıdır. Bu sınırlamadan kaynaklanan etkiyi ortadan kaldırmak için rampa çıkış geriliminden örnek alınarak bu değerin ideal rampa eğimine uygun olması için gerekli düzeltmeler belirli bir oranda bölünerek integratör girişine uygulanır. Bu şekilde iteratif bir yöntem kullanılarak bu etkiler belirli oranda ortadan kaldırılmış olur.

İletkenlik Ölçümleri

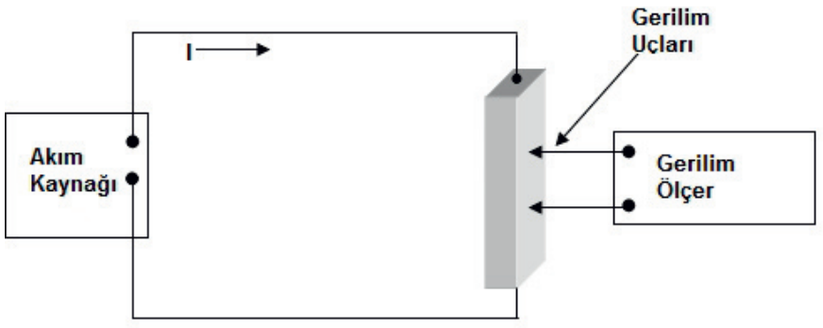
İletken bir malzemenin Siemens/metre cinsinden özdirencinin ve öziletkenliğinin tespit edilebilmesi için temel olarak iki ölçüm yöntemi vardır. Bunlar Doğru Akım (DC) iletkenlik ve Alternatif Akım (AC) iletkenlik ölçüm tekniklerdir. Numunenin kullanım amacı ve kullanım yerine göre bu tekniklerden birisiyle ölçümler gerçekleştirilir.

DC İletkenlik Ölçümleri

DC iletkenlik ölçüm tekniğinde, düz yatay bir zemin üzerindeki numuneye sabit bir akım uygulanır. Numune üzerine yerleştirilmiş olan gerilim probları yardımıyla numune üzerindeki gerilim değeri ölçülür. Ölçülen bu gerilim değeri ve numunenin boyutsal ölçüleri yardımıyla numunenin özdirenci ve öziletkenliği bulunur. Bunun için iki türlü prob ölçüm tekniği kullanılır. Bunlar iki uçlu ve dört uçlu prob ölçüm teknikleridir. Numunenin boyutlarına bağlı olarak prob teknikleri de farklılıklar gösterir.

İki Uçlu Prob Tekniği:

Bu teknik, kesitleri düzgün bir alana sahip (kare, dikdörtgen veya dairesel) olan iletken çubukların ölçümlerinde kullanılır. Numunenin kesit alanı, uzunluğu boyunca ölçümler alınarak tanımlanır. Bilinen bir akım çubuğun içerisinden geçirilir ve sonra akım yönü boyunca yüzey üzerine yerleştirilmiş olan iki prob arasından bir gerilim değeri okunur. Herhangi bir çubuk materyal için verilen özdirenç, numunenin uzunluğu boyunca düzgün olarak ölçülür. Özdirenç ve iletkenlik uygun geometrideki numunenin boyutsal ölçüleri de kullanılarak hesaplanır.

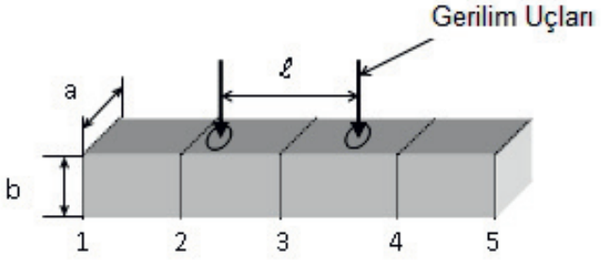


Şekil 226. İletkenlik ölçüm düzeneği

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I}{V} \times \frac{\ell}{a \times b} \quad \text{MS/m} \tag{75}$$

V : Numune üzerine düşen gerilim (V)
I : Numune üzerinden akan akım (A)
ρ : Numunenin özdirenci (Ω cm)
σ : Numunenin iletkenliği (MS/m)
a : Numunenin eni (m)
b : Numunenin yüksekliği (m)
ℓ : Numune üzerindeki potansiyel uçları arasındaki mesafe (m)

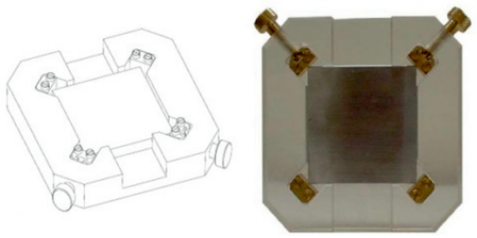
Numunenin iletkenliği hesaplanırken boyutsal ölçümler oldukça önemlidir. Boyutsal ölçümlerde numunenin boyu, eni ve yüksekliğinin hassas bir şekilde ölçülmesi gereklidir. Yükseklik ve en ölçümleri numunenin uzunluğu boyunca beş farklı noktadan ölçümler alınarak gerçekleştirilir, alınan ölçümlerin ortalaması alınır ve hesaplamalara katılır. Uzunluk ölçümleri ise gerilim probları arasındaki mesafenin ölçülmesiyle gerçekleştirilir.



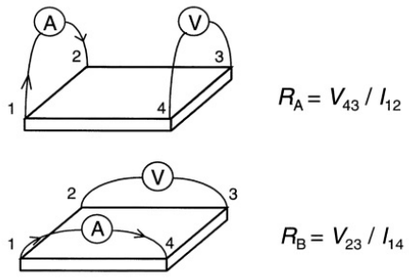
Şekil 227. Numunenin boyutsal ölçümlerinin gerçekleştirilmesi

Van der Pauw Tekniği:

İki uçlu prob tekniğinde numunenin 3 boyutlu ölçümleri ve gerilim uçları arasındaki mesafelerin ölçümleri çok önemlidir. Ayrıca numuneler büyük boyutlu olduğunda numunenin kalınlığı boyunca aynı homojenliğe sahip olması zordur. Van der Pauw tekniğinde önceki tekniğe göre daha küçük ve kare şeklinde numuneler kullanılır. Van der Pauw bağlantısı, Şekil 228'de verilmiştir.



Şekil 228. Van der Pauw bağlantı tekniği [140]



Şekil 229. Van der Pauw yönteminde alınan ölçümler

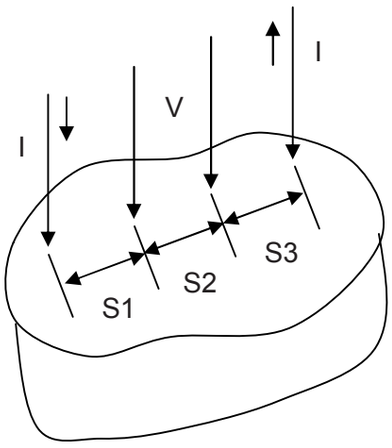
Bu yöntemde daha önce anlatılan yönteme göre daha az boyut ölçümüne gerek vardır. Gerilim kontakları arası mesafe de numunenin boyutları yardımı ile elde edilir. Van der Pauw ölçüm yöntemindeki bağlantı şekilleri Şekil 229'da verilmiştir [139].

Eğer ölçülen malzemenin direnci R_S olarak adlandırılırsa R_A, R_B ve R_S ile ilgili olarak aşağıdaki ifade yazılabilir [141][133]:

$$e^{-\pi R_A/R_S} + e^{-\pi R_B/R_S} = 1 \qquad (76)$$

Dört Uçlu Prob Tekniği:

Özellikle yarıiletken teknolojisinde iletkenlik ölçümlerinde geniş bir uygulama alanı vardır. Bu test metodu kesit alanı düzgün olmayı gerektirmeyen yani şekli düzensiz olan numunelerin ölçümlerinde kullanılır. Bu yöntem ayrıca sıvıların iletkenliği için de kullanılır. Ancak kontak alma yöntemleri farklıdır.



Şekil 230. Dört uçlu prob blok şema

Ölçümler gerçekleştirilirken probların değmesi için işe yarar yassı düz bir bölge sağlanır. Dört uçlu probun blok şeması Şekil 230'da gösterilmiştir. Problar numune üzerine aşırı basınç uyguladıkları zaman numuneye zarar verebilir. Alışılmış olan, probların yerleşim düzeni eşit aralıklarla bir hat üzerindedir. Akım, dışarıdaki problardan geçirilir ve içteki iki proptan da gerilim değerleri okunur.

AC İletkenlik Ölçümleri

İletkenlik ölçümleri her zaman numunelere temas ederek ölçülmez. Girdap Akımı yöntemi ile çalışan iletkenlik ölçerler numunelerin yüzey iletkenliklerini numunelere temas etmeden ölçerler. Bu cihazlar genellikle 60 kHz - 500 kHz frekans aralığında çalışırlar.

Bu cihazların izlenebilirlikleri iki yöntemle sağlanır. Bunlardan biri DC iletkenlik ölçümlerinden sağlamaktır. Ancak AC ve DC ölçümler arasında farklar olduğu ve bu farkların azaltılması için çalışmalar yapılmaktadır [140]. Diğer bir yöntem ise Van der Pauw yöntemidir. Bu yöntemde, küçük boyutlu numuneler kullanıldığından numuneler daha homojen olur. Bu da AC ve DC iletkenlik ölçümleri arasındaki farkı azaltır. Yine de % 1 seviyesinde doğruluğa sahip cihazlar için bu fark önemli değildir.

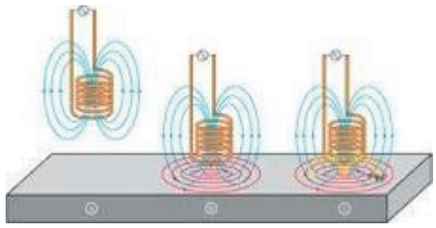
İzlenebilirliğin elde edildiği diğer yöntem ise Heydweiller köprüsü aracılığı [142] ile AC direnç biriminden elde etmektir.

AC iletkenlik birimi Megasiemens/metre (MS/m) veya International Annealed Copper Scale (% IACS) olarak verilir (58 MS/m = 100 % IACS). İletkenlik ölçümlerinde sıcaklık ve frekans önemli parametrelerdir.

AC İletkenlik Ölçerler

Malzemelerin AC iletkenliğini belirlemek kullanılan cihazlar girdap akımı (Eddy Current) metodu ile çalışır. Girdap akımları metodunun temelleri Michael Faraday'ın 1831'de öne sürdüğü elektromanyetik kuramına dayanır. Eddy current prensibine dayanan ilk iletkenlik cihazını ise David E. Hudges geliştirmiştir.

Bir sarımdan AC akım geçirildiğinde bu sarım etrafında bir manyetik alan meydana gelir. Bu sarım elektriksel olarak iletken bir malzeme yüzeyine yaklaştırıldığında, sarımın değişken manyetik alanı malzeme yüzeyinde indüksiyon akımları oluşturur. Bu akımlar kapalı bir devre halinde akarlar ve girdap akımları olarak adlandırılırlar. Girdap akımları da kendi manyetik alanlarını yaratırlar. Yaratılan bu ikincil manyetik alan ölçülerek yüzey hataları bulunabilir, malzemenin iletkenlik, geçirgenlik gibi parametreleri belirlenebilir.



Şekil 231. Girdap Akımı çalışma prensibi

Bu metot elektriksel olarak iletken olan bütün malzemelerde (bakır, alüminyum, vb.) yüzey ve yüzey altı süreksizliklerinin (çatlaklarının) tespiti için kullanılır. Girdap akımları muayenesi metodu ile ayrıca elektriksel iletkenlik veya manyetik geçirgenlik gibi özelliklere dayanarak malzemelerin sınıflandırılması da mümkündür. Bunlardan başka kaplama kalınlığı veya ince metal levhaların kalınlığı ölçümleri de yapmak mümkündür.

Heydweiller köprüsü aracılığı ile elde edilen izlenebilirlik çalışma standartlarına aktarılır [143]. İletkenlik ölçüm cihazları bu çalışma standartları yardımıyla kalibre edilirler. Aşağıda bir iletkenlik standartları seti görülmektedir.



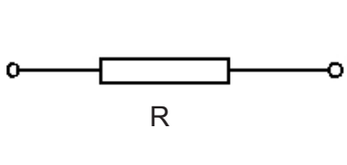
Şekil 232. AC İletkenlik Standartları

AC DİRENÇ

Cisimlerin, kendi üzerinden geçen elektrik akımının akmasına karşı gösterdikleri zorluğa direnç denir. Uygulanan gerilimin cisim üzerinden geçen akıma oranı olarak tanımlanır ve R ile gösterilir. Direnç birimi Ohm'dur ve Ω ile ifade edilir.

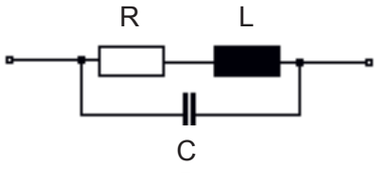
$$R=V/I \tag{77}$$

Üzerine DC gerilim uygulanmış cismin gösterdiği direnç Şekil 233'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 233. Bir cismin DC gerilim uygulandığında gösterdiği direnç

Cismin üzerine DC gerilim yerine AC gerilim uygulandığında ise dirençten farklı olarak başka parametreler de devreye girer. AC gerilim bir cisme uygulandığında bir elektron akışının yanı sıra bir manyetik alan ve bir de elektrik alan meydana getirir. Bu cismin elektron akışına karşı gösterdiği zorluk direnç olarak ortaya çıkarken, manyetik alandan akım üretme kabiliyeti oranında bir indüktansı, elektrik alandan gerilim üretme kabiliyeti oranında da bir kapasitansı vardır. Bu durumda üzerine AC gerilim uygulanan bir cisim Şekil 234'teki gibi modellenir.



Şekil 234. İki terminalli AC direnç eşdeğeri

Şekil 234'te de görüldüğü gibi üzerine AC gerilim uygulanan her cismin mutlaka bir direnci, bir kapasitansı ve bir indüktansı vardır. AC akım uygulandığında direnç yerine kapasitans, indüktans ve direncin bir bileşkesi olan empedans terimi kullanılır. Empedans, Z ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Z=R + jX \tag{78}$$

Buradaki empedansın büyüklüğü de Eşitlik (79) yardımıyla hesaplanır.

$$Z=\sqrt{R^2+X^2} \tag{79}$$

Bu ifadede R empedansın gerçel kısmını X ise kapasitans ve indüktans tarafından oluşturulan sanal kısmını ifade eder.

AC direnç bir cismin empedansının gerçel kısmı olarak ifade edilir. Uygulanan AC gerilimin büyüklüğü ve frekansına bağlı olarak değişim gösterir.

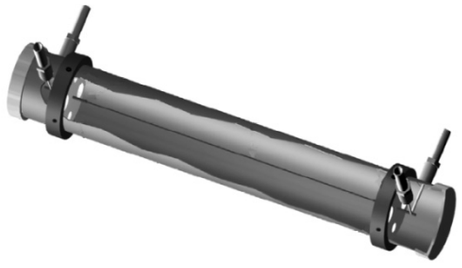
7.4.3.3 AC Direnç Elde Edilmesi Ve Dağıtımı

AC direnç biriminin birincil seviyede, bir başka deyişle en iyi belirsizlikle, ölçülebilmesi için AC gerilimde davranışı karakterize edilmiş standartlar kullanılır. Bu standartların frekans davranışları, boyutları kullanılarak hesaplanır. DC değeri ölçülen, AC karakteristiği de hesaplanan bu dirençler tüm dünyada AC direnç biriminin birincil seviye standardı olarak kullanılır.

AC direncin izlenebilirliği iki yoldan sağlanır. Birinci yol AC direnç standardının DC değerinin Kuantum Hall standardı ile belirlenmesi yoludur. İkinci yol ise hesaplanabilir kapasitör kullanılarak elde edilen kapasitans değerinin ve RC Quadrature köprü yardımı ile AC direnç standardının değerinin belirlenmesidir.

Hesaplanabilir AC/DC Direnç Standardı

Hesaplanabilir direnç standardı kapasitansı ve indüktansı çok az olan dolayısıyla DC değeri ile AC değeri arasında çok az fark bulunan bir direnç ihtiyacı üzerine düşünülüp ve tasarlanmıştır. İdealde bir direncin artık parametrelerini düşük tutmanın en kolay yolu o direnci olabildiğince basit yapmaktır. Bu yapı da bir direnç telinin iki ucundan tutup gerdirdiğiniz yapıdır. Bu tel bir dış kutu ile ekranlanırsa koaksiyel yapı ortaya çıkar. Şekil 235'te görülen bu yapıya sahip dirençler koaksiyel tip hesaplanabilir AC direnç olarak adlandırılır.



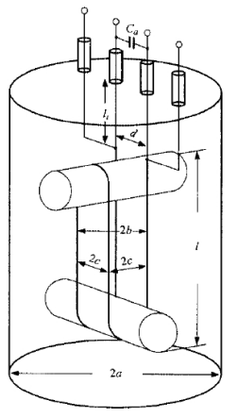
Şekil 235. Koaksiyel hesaplanabilir direnç yapısı [144]

Böyle basit bir yapıda oluşacak kapasitans ve indüktans değerlerini hesaplamak da kolay olacaktır. Buna ek olarak yapılan teorik hesaplamanın da pratik sonuçlarla uyumlu olması için yapının basit olması önemlidir.

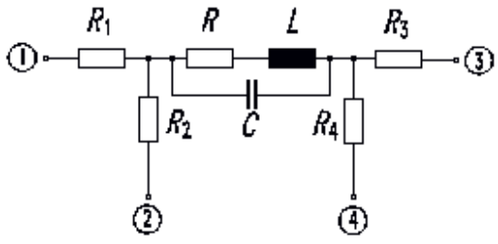
Tasarlanan ve üretilen hesaplanabilir direncin frekans karakteristiği, boyutları kullanılarak hesaplanır. Hesaplanabilir direnç yalnızca bir telden oluşur. Bu, Şekil 235'te görüldüğü gibi yalnızca düzgün bir hat olabilmekle beraber direncin dış kutusunun boyutlarını küçültmek için ikiye ya da dörde katlamış bir şekilde de yapılabilir. İkiye katlanmış hatta "bifilar", dörde katlanmış hatta ise "quadrifilar" hesaplanabilir direnç ismi verilir.

Direnç ölçümlerinin düşük belirsizlikle yapılabilmesi için kullanılan yöntem 4 uçlu direnç ölçüm yöntemidir. Dört uçlu ölçüm yöntemi kablo ve konektör dirençlerinin direnç ölçümüne olan etkisini ihmal edilebilir seviyeye indirmek için kullanılan bir yöntemdir.

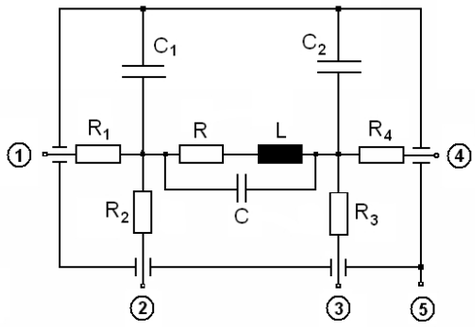
Hesaplanabilir AC direnç standartlarının ölçümleri de 4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 237'de bir dört uçlu direncin eşdeğer devresi görülür. Bu direncin ekranlı ve 4-uçlu eşdeğer devresi ise Şekil 238'de görülmektedir.



Şekil 236. Quadrifilar hesaplanabilir direnç yapısı [145]



Şekil 237. Dört uçlu direnç eşdeğer devresi



Şekil 238. Dört uçlu ekranlı direnç eşdeğer devresi

Görüldüğü gibi ekranlı devrede ekransız olan devreye göre daha fazla parametre devreye girmektedir. Direnç ile ekran arasındaki kapasitanslar da belirleyici rol oynar. Tüm bu parametreleri hesaplamak için, direnç telinin çapı, dış kutunun çapı, direnç teli ile dış kutu arasındaki mesafe, ortamın dielektrik katsayısı, dış kutunun kalınlığı, dış kutunun iletkenliği vs. gibi terimler kullanılır.

Temel olarak dört terminalli direnç devresinin empedansı şu şekilde yazılabilir:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} \tag{80}$$

Empedans, gerçel ve sanal iki kısımdan oluşur ve genel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$Z=R_{\omega}\,(1+ j\,\omega\tau) \tag{81}$$

Bu ifadedeki reel kısım AC direnç değeridir ve Eşitlik (82) ile elde edilir.

$$R_W \approx \frac{R}{1 - \omega^2\,(2\,LC - R^2C^2)} \tag{82}$$

Empedans değerinin sanal kısmı da Eşitlik (83) ile elde edilir.

$$\tau = \frac{L}{R} - R\,C \tag{83}$$

Eşitlik (83)'de, R, direncin DC değeri, R_W ise AC değeridir. Empedansın sanal kısmını oluşturan ise zaman sabiti olarak adlandırılan τ terimidir. Empedansın reel kısmının değişimi DC-10 kHz frekans aralığında 0,1 ppm'den küçüktür. Sanal kısmının değişimini bulmak için zaman sabitinin hesaplanması gerekir.

Hesaplanabilir direncin sanal kısmının değeri, faz açısı kalibrasyonlarında ve kapasitörlerin kayıp faktörlerinin kalibrasyonunda kullanılır.

AC Direnç Biriminin Dağıtılması

Hesaplanabilir AC dirençler kullanılarak elde edilen AC direnç değerlerinin referans AC direnç değerlerine aktarılması gereklidir. Kapasitans biriminin elde edilmesinde kullanılacak olan AC direnç biriminin referans AC direnç standartlarına 10^{-8} seviyesinde doğrulukla aktarılması gerekir.

Bu doğrulukla AC direnç karşılaştırması yapabilen sistemler, indüktif gerilim bölücüler kullanılarak kurulan ölçüm sistemleridir.

7.4.3.4 AC Direnç Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

DC direnç ölçümlerinde kullanılan 2-uçlu ve 4-uçlu ölçüm yöntemleri temel olarak AC direnç ölçümlerinde de kullanılan yöntemlerdir. DC direnç ölçümlerinde olduğu gibi AC direnç ölçümlerinde de 4-uçlu ölçüm yöntemi bağlantı kablolarından ve konektörlerinden gelen hataları yok eder. Ancak AC direnç ölçümlerinde AC akım uygulandığından ölçüm yönteminin elektrik alan ve manyetik alandan kaynaklanan hataları da gidermesi beklenir. Bu nedenle AC direnç ölçümlerinde 4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi kullanılır. Bu ölçüm yönteminin ayrıntılı açıklaması "Kapasitans Ölçüm Yöntemleri" bölümünde yapılmıştır.

7.4.4 İNDÜKTANS

Elektrik devrelerinde akan akım bir manyetik akı üretir. Devrede üretilen manyetik akı miktarının devreden geçen akıma oranına o devrenin kendi indüktansı (self-inductance) denir ve şu şekilde ifade edilir:

$$L = \phi / i \qquad (84)$$

Bir indüktörün üzerinden akan akımın değişimi indüktörün iki ucu arasında bir gerilim oluşmasına neden olur. Bu gerilim değeri Eşitlik (85) ile verilir.

$$V = L \times di/dt \qquad (85)$$

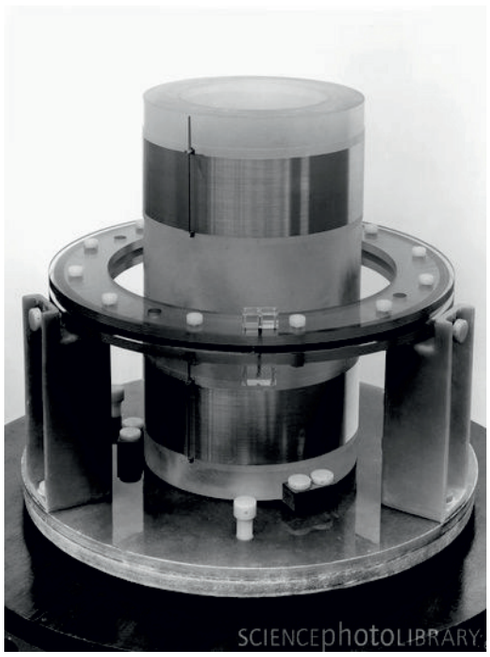
Bir devreden akan değişken akım başka bir kapalı devre üzerinde gerilim oluşmasına neden olabilir. Bu durum iki devre arasındaki karşılıklı (mutual) indüktans ile mümkün olur. Karşılıklı indüktans ile ilgili olarak Eşitlik (86) yazılabilir.

$$V = M \times di/dt \qquad (86)$$

7.4.4.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

İndüktans Biriminin Tarihçesi

İndüktans birimi, hesaplanabilir kapasitörün bulunmasına kadar hesaplanabilir indüktör yardımı ile elde edilmiştir. Hesaplanabilir indüktörün indüktansı, boyutları yardımıyla hesaplanabilir [146].



Şekil 239. Hesaplanabilir Karşılıklı İndüktans standardı (Science Photo Library'den alınmıştır)

Hesaplanabilir indüktör standardı, 20. yüzyılda 1960 yılına kadar indüktans, direnç ve kapasitans birimlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu standart kullanılarak elde edilen belirsizlik (1 – 10) ppm arasındadır.

1957 yılında hesaplanabilir kapasitörün icadından sonra kapasitans birimi 0,01 ppm doğrulukla elde edilebilmiştir. Direnç ve indüktans birimleri de hesaplanabilir kapasitör kullanılarak elde edilmeye başlanmıştır.

İndüktans Biriminin Tanımı

İndüktans bir elektriksel elemanın üzerine uygulanan değişken akıma karşılık gerilim üretme kapasitesi olarak adlandırılır. Direnç, kapasitans gibi fiziksel sabitlere ya da daha doğru yapılan başka ölçümlere dayandırılan güncel bir tanımı yoktur.

Ancak 1960'lı yıllara kadar indüktans birimi hesaplanabilir indüktans yardımı ile elde edilmiştir. Günümüzde ise başka birimlere izlenebilir olarak elde edilmektedir.

İndüktans Biriminin Elde Edilmesi

1957 yılında hesaplanabilir kapasitörün bulunmasından sonra yapılan çalışmalar kapasitans biriminin 0,01 ppm mertebesinde elde edilebileceğini göstermiştir. Bu gelişmenin ardından metroloji dünyası hesaplanabilir karşılıklı indüktansı bırakıp hesaplanabilir kapasitörü kullanmaya başlamıştır. Çünkü bu standart yardımıyla kapasitans ve direnç birimleri 0,01 ppm seviyelerinde elde edilirken indüktans birimi yine 10 ppm mertebesinde elde edilebilir hale gelmiştir.

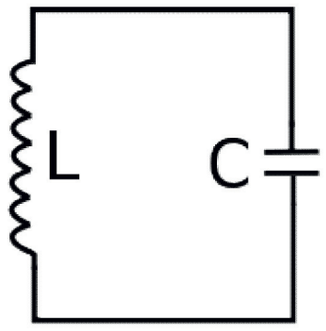
1984 yılında Quantum Hall etkisinin bulunmasından sonra bu konuda çalışmalar yapılmış ve direnç biriminin 0,001 ppm seviyelerinde elde edilebilir olduğu görülmüştür. 1990 yılından sonra metroloji enstitüleri, kurması ve çalıştırması hesaplanabilir kapasitöre göre daha kolay olduğu için Quantum Hall sistemine yönelmişlerdir.

Her iki durumda da indüktans birimi kapasitans ve direnç birimlerinden elde edilir. Bu konuda genel olarak kullanılan yöntemler rezonans yöntemi ve Maxwell-Wien köprüsü yöntemidir. Ancak metroloji enstitülerinde yaygın olmasa da 3-gerilim yöntemi de kullanılır. Bu yöntemler birincil seviye indüktans ölçüm yöntemleri olarak sınıflandırılırlar.

Rezonans Yöntemi

Bu yöntemde değeri bilinen bir kapasitör ile değeri belirlenecek olan indüktör paralel bağlanır. Bu iki eleman rezonansa girdiğinde devrenin eşdeğer direnci en büyük (teorik olarak sonsuz) olur. Devrenin eşdeğer direncinin en büyük olduğu frekans değeri Eşitlik (87)'de verilmiştir. Bu eşitlikteki frekans değeri ölçülürse değeri bilinen bir kapasitör yardımıyla indüktans değeri belirlenmiş olur.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \times C}} \qquad (87)$$

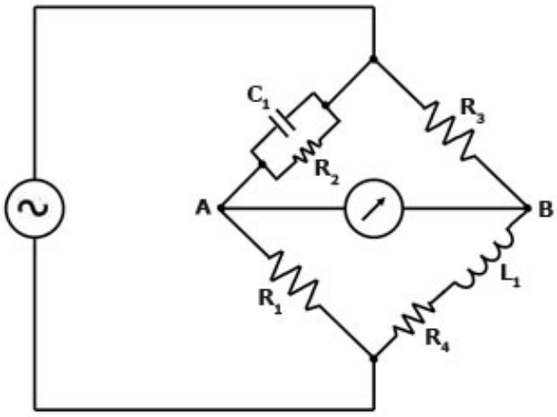


Şekil 240. Paralel LC rezonans devresi

Bu durumda indüktans standardının değeri, değeri bilinen kapasitans standardı ve frekans değeri kullanılarak elde edilmiş olur.

Maxwell-Wien Köprüsü

İndüktans biriminin elde edilmesinde rezonans yöntemine göre daha çok kullanılan yöntem Maxwell-Wien köprüsü yöntemidir.



Şekil 241. Maxwell-Wien Köprüsü

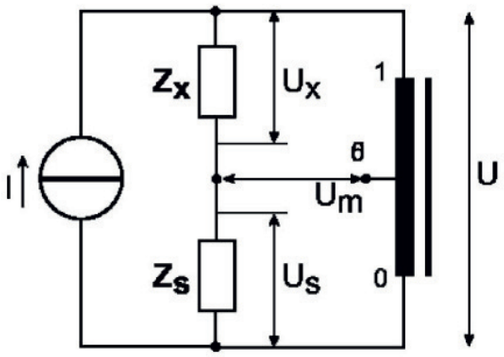
Maxwell-Wien köprüsü basit olarak 4 direncin karşılaştırıldığı Wheastone köprüsüne benzer. Ancak karşılıklı 2 kolunda direnç yerine kapasitans ve indüktans bulunur. Köprüde denge durumunda aşağıdaki eşitlik geçerli olur.

$$L_1 = R_1 \times R_3 \times C_1 \qquad (88)$$

Eşitlikten de anlaşılabileceği gibi indüktans birimi daha iyi bilinen iki birimden yani AC direnç ve kapasitans birimlerinden elde edilir. Kapasitans ve AC direnç birimlerinin en iyi ölçüm belirsizlikleri 0,1 ppm'den düşüktür. Bu da 10 ppm civarında bir belirsizlik hedeflenen indüktans biriminin elde edilmesi için yeterlidir.

Diğer Yöntemler

Metroloji enstitülerinde çok sık kullanılmayan bir diğer indüktans ölçüm yöntemi 3-gerilim yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntemde karşılaştırılmak istenen iki empedans büyüklüğü (direnç ve indüktans) Şekil 242'deki gibi seri bağlanır.



Şekil 242. 3-gerilim yöntemi devre şeması

3-gerilim yönteminde U, U_x ve U_s gerilimlerinin hem genlikleri hem de faz açıları ölçülür. Yani Şekil 242'de gösterilen her bir gerilim vektörel olarak belirlenir. Ölçülen gerilimler arasında da vektörel ilişki kurularak denge denklemleri elde edilir.

İndüktans Biriminin Referans Standartlara Aktarımı

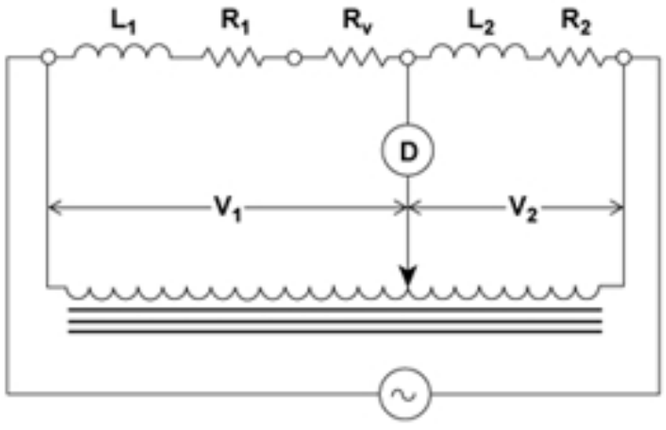
Önceki bölümlerde bahsedilen yöntemlerden birinde elde edilen indüktans değeri ölçülmek istenen diğer indüktans değerlerine aktarılmalıdır. Bunlar aynı değerlerde indüktans standartları olabildiği gibi farklı değerlerde standartlar da olabilir. Söz gelimi 100 mH değerinde elde edilen indüktans değerinin 100 µH ile 10 H aralığındaki tüm indüktans değerlerine aktarılması gerekir. İndüktans değerinin aktarımı için birden fazla yöntem bulunur. Bazı laboratuvarlarda geniş bir aralıktaki indüktans değeri doğrudan birinci seviye ölçüm yöntemi ile elde edilirler. Örneğin UME'de 100 µH – 10 H aralığındaki tüm indüktans standartlarının değerleri Maxwell-Wien köprüsü ile belirlenir. Ancak bazı metroloji laboratuvarlarında tek bir değerde elde edilen indüktans değeri aşağıda bahsedilen yöntemler aracılığı ile diğer indüktans değerlerine aktarılır.

Yerine Koyma Yöntemi:

Bu yöntemde aynı değerlere sahip indüktans standartları karşılaştırılarak değer aktarımı gerçekleştirilir. Bunun için kararlı bir indüktans ölçere gerek vardır. Bu indüktans ölçer ile önce değeri bilinen indüktans standardı, ardından da değeri belirlenecek olan indüktans standardı ölçülür. İlk ölçümle belirlenen indüktans ölçerin ölçüm hatası ikinci ölçümde düzeltilir ve değeri belirlenmek istenen indüktans standardının değeri belirlenir. UME'de her bir değerden 4 adet standart bulunmaktadır. Bu standartlardan birinin değeri Maxwell-Wien ile belirlenirken diğer 3 indüktans standardının değeri bu yöntemle belirlenir.

Oran Köprüsü Yöntemi:

Belli bir değerde birincil seviye indüktans yöntemi ile belirlenen indüktans değeri, farklı değerlere oran köprüsü ile aktarılır. İndüktans standartları her zaman 10'un katları şeklinde üretilirler. Bu nedenle örneğin 10 mH değerindeki standardın değeri, birincil seviye sistem ile belirlenmişse 100 mH ve bu değerin üzerindeki değerler ile 1 mH ve altındaki değerler 1/10 oran köprüsü ile ölçülürler. Oran köprülerinde indüktif gerilim bölücüler kullanılır. Aşağıda böyle bir köprü görülmektedir.



Şekil 243. İndüktans karşılaştırma köprüsü

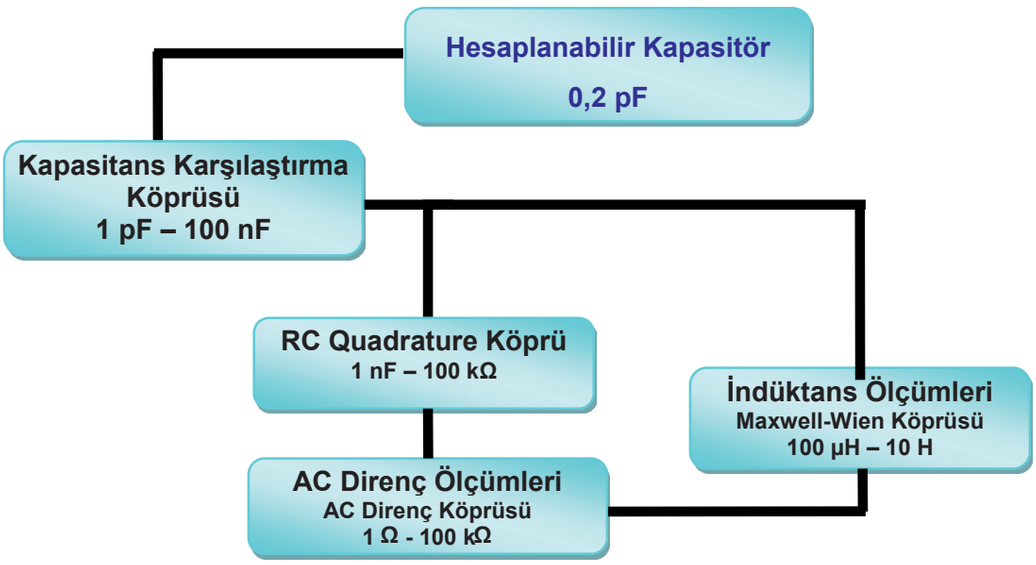
İndüktif gerilim bölücüler ile kurulan bu köprülerle, doğruluğu 5 ppm'den iyi 1/1 karşılaştırma, doğruluğu 10 ppm'den daha iyi 1/10 karşılaştırma yapılabilir. İndüktif gerilim bölücüler zamanla kaymaları az ve sıcaklıktan etkilenmeyen cihazlar oldukları için bu tür köprülerde kullanılmaları çok avantajlıdır.

Küçük Değeri Ekleme Yöntemi:

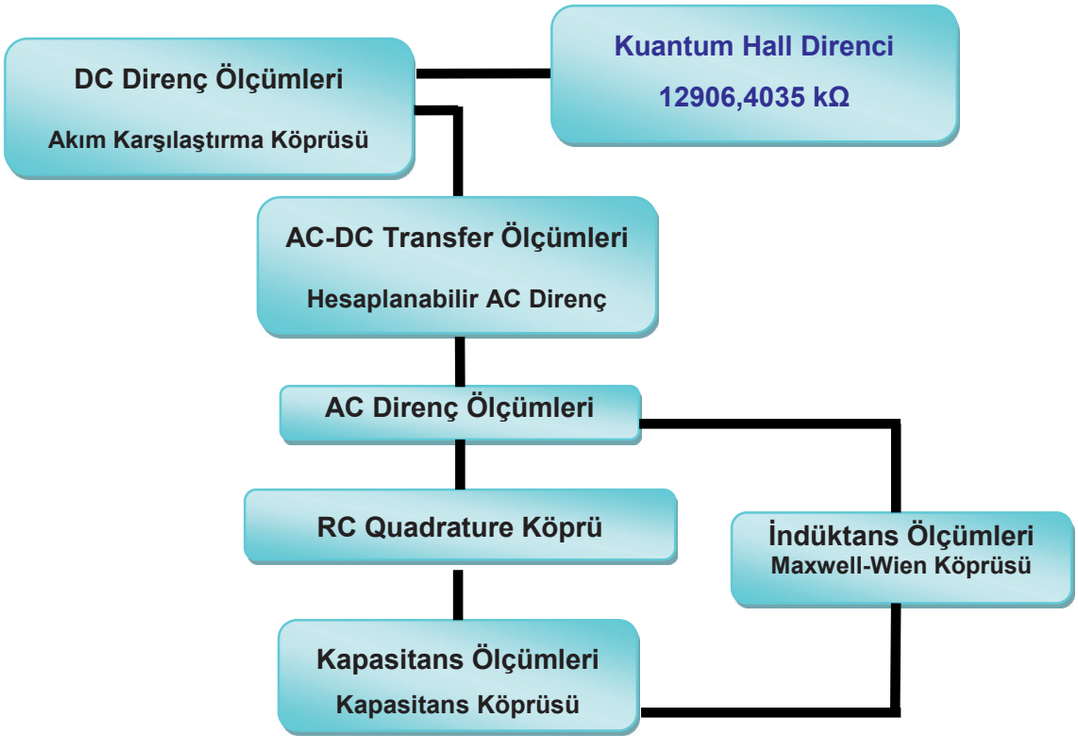
Oran köprüsü kullanmadan farklı değerleri birbiri ile karşılaştırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde karşılaştırılan indüktans değerlerinin oranları en az 1/100 olmalıdır. Örneğin, 100 mH ve 1 mH indüktansları kullanılırsa; ilk ölçümde 100 mH ölçülür, ardından 1 mH seri bağlanarak ikinci bir ölçüm alınır. Her iki ölçümde de indüktans ölçerin aynı kademede ölçüm alması sağlanır. İndüktans ölçerin 100 mH ve 101 mH için yaklaşık aynı hata ile ölçüm aldığı kabul edilir. Bu iki ölçüm sonucu birbirinden çıkarılarak 1 mH değeri belirlenir. İndüktans ölçüm cihazının doğrusallığı ölçüm doğruluğunu doğrudan etkiler.

İzlenebilirlik Zinciri

İndüktans biriminin izlenebilirliği iki farklı yoldan elde edilmektedir. Birinci yolda izlenebilirlik hesaplanabilir kapasitörden, ikinci yolda ise Kuantum Hall direncinden elde edilir. Bu izlenebilirlik zincirleri sırası ile Şekil 244 ve Şekil 245'te verilmiştir.



Şekil 244. İndüktans biriminin hesaplanabilir kapasitörden elde edilmesi



Şekil 245. İndüktans biriminin Kuantum Hall direncinden elde edilmesi

7.4.4.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Metroloji laboratuvarları tarafından kullanılan en doğru ve kararlı indüktans standartları General Radio üretimi standart indüktörlerdir. İndüktans standartları 2 veya 3 terminalli standartlardır.



Şekil 246. Standart indüktör



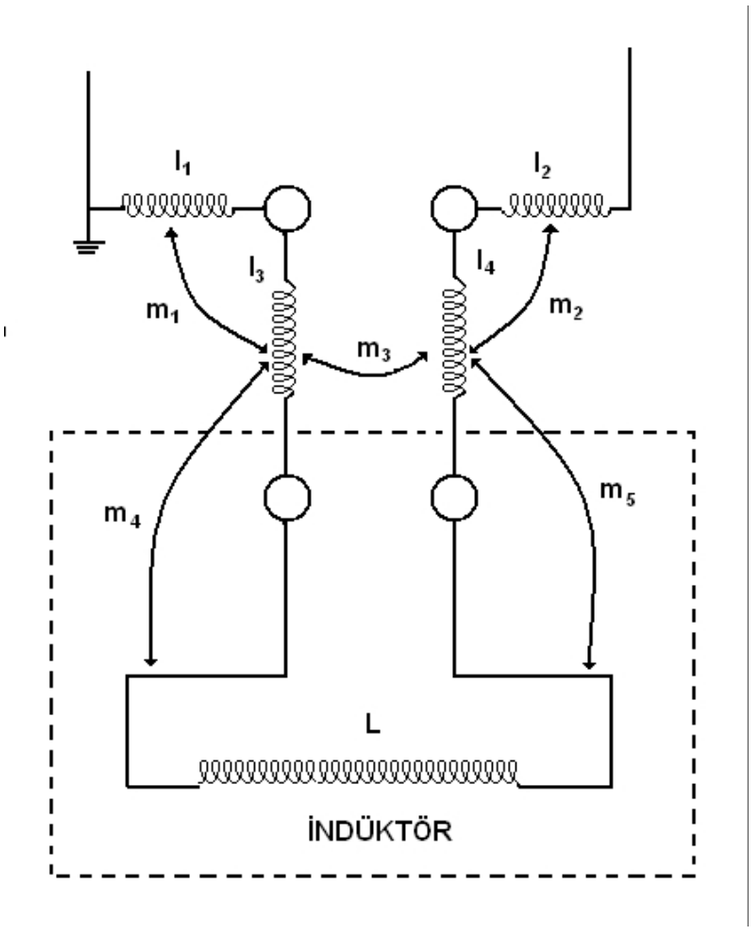
Şekil 247. Yüksek frekans uygulamaları için kullanılan standart indüktör

Şekil 246'daki standart indüktör tipi, toroid yapı üzerine sarılmış indüktörlerdir. Sıcaklık kararlılıklarını arttırmak için seramik çekirdek kullanılmıştır. Ancak sarımlar arası kapasitans

değeri yüksektir. Bu nedenle yüksek frekans uygulamaları için uygun değildir. Yüksek frekans uygulamalarında kullanmak amacıyla daha düşük değerde ve solenoid üzerine sarılmış indüktörler kullanılır.

İndüktans ölçümlerinde kullanılan bağlantı şekli geleneksel olarak 2-uçlu bağlantı şeklidir. Bunun temel nedeni ilk üretilen referans indüktörlerin 2-uçlu olarak üretilmesidir.

2-uçlu indüktans ölçümünde indüktans standardının değerine ek olarak ölçüm kablolarının indüktansı da ölçüm sonucuna dahil olur. Bu nedenle ölçüm kablolarının etkisinin giderilmesi için öncelikle bağlantı kablosunun indüktansının azaltılması ve sabit tutulması gereklidir. Bir indüktörün ölçüm cihazına bağlandığı anda devreye giren indüktanslar Şekil 248'de görülmektedir.

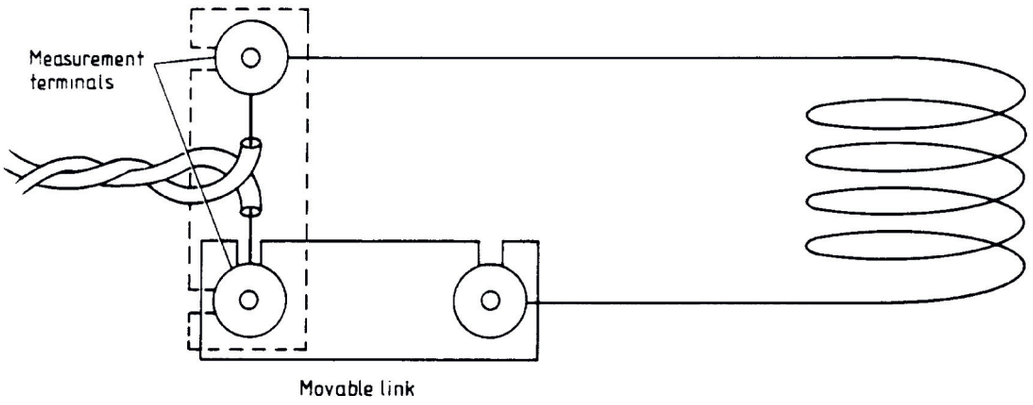


Şekil 248. İndüktans ölçümünde oluşan indüktanslar

İndüktans ölçümünü doğru yapabilmek için ölçümün Şekil 248'de görülen indüktanslardan etkilenmesini en aza indirmek gerekir.

Kabloların kendi indüktansının ve ölçüm devresinin karşılıklı indüktansının azaltılması amacıyla bükülen kabloların konumlarının da sabit tutulması gereklidir. Şekil 248'de "m" ile gösterilen karşılıklı indüktans değerleri kabloların konumlarına göre değişen bir parametredir. Kablo indüktansını belirlerken yapılan ölçüm ile indüktörün değerinin belirlendiği ölçümler esnasında kabloların konumlarının değişmemesine azami özen gösterilmelidir.

Bağlantı kablolarının indüktanslarının düşürülmesi için ölçüm kabloları birbiri üzerine bükülmelidir (Şekil 249). Bunun nedeni ölçüm kablolarının dahil olduğu devrenin kesit alanını düşürerek devre içinden geçen akı miktarını düşürmektedir. Buna ek olarak ölçüm kablolarının içerisinden geçen akımların oluşturduğu manyetik alanlar birbirini azaltıcı etki yaparak kabloların kendi indüktansını da azaltır.



Şekil 249. İndüktans ölçümünde kabloların bükülmesi

Günümüzde üretilen indüktans ölçerlerin büyük bir kısmı 4-uçlu ekranlı olarak üretilir. Bunun için indüktans standartlarının 4-uçlu ekranlı ölçümleri de gündeme gelmektedir. 4-uçlu ekranlı indüktans ölçümleri ile ilgili çalışmalar metroloji enstitüleri tarafından yürütülmektedir [147].

7.4.5 KAPASİTANS

Kapasitans, bir cismin elektriksel yükü depolama kapasitesidir. Kapasitans, cisme uygulanan elektriksel gerilime karşılık depolanan elektriksel yük miktarının bir ölçüsü olarak da tanımlanabilir. C ile gösterilir, birimi Farad'dır. 1 Farad, 1 Coulomb/Volt'a eşittir ve bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$C = \frac{Q}{V} \tag{89}$$

Bir kapasitörün içerisinde depolanan enerji ise aşağıdaki gibi gösterilir.

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \tag{90}$$

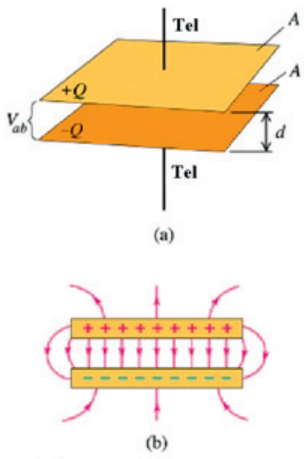
Kapasitans, aralarında gerilim farkı olan ve birbirine temas etmeyen iki iletken arasında oluşur. Bir başka deyişle bir elektriksel düzeneğin yük depolama kapasitesine sahip olabilmesi için bir yalıtkan ile birbirinden izole edilmiş iki iletkene ihtiyaç vardır. Böyle bir yapıda kapasitans, iletkenlerin yüzeyleri büyüdükçe büyür, iletkenler arasındaki mesafe arttıkça azalır. Buna göre C kapasitans değeri Eşitlik (91) ile ifade edilir:

$$C = \varepsilon \times \frac{A}{d} \tag{91}$$

Bu eşitlikte A iletkenlerin birbirlerine bakan yüzeylerinin m^2 birimi ile ifadesi; d iletkenler arası mesafenin m birimi ile ifadesi; ε ise iletkenler arasındaki yalıtkanın dielektrik katsayısıdır ve birimi F/m'dir. Yalıtkanın dielektrik katsayısı ise şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon = \varepsilon_R \times \varepsilon_0 \tag{92}$$

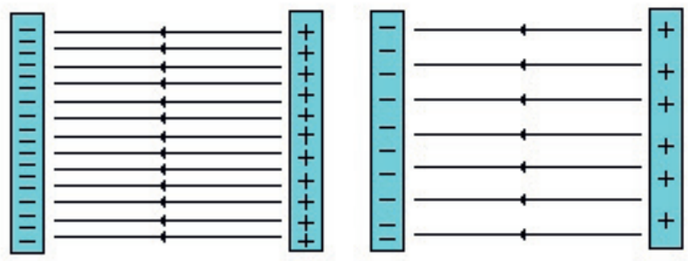
ε_0 boşluğun dielektrik katsayısıdır ve yaklaşık değeri $8{,}854 \times 10^{-12}$ F/m'dir; ε_R ise söz konusu yalıtkanın bağıl dielektrik katsayısıdır. Bu katsayı o malzemenin, üzerinden geçen elektrik alana karşı gösterdiği geçirgenliğin bir göstergesidir. Örneğin hava için bu değer 1, kâğıt için 3,6, su için 80'dir. Bir kapasitör yapısında potansiyel farkları olan iki iletken arasında elektrik alan oluşur. Bir başka deyişle kapasitör plakaları arasındaki etkileşim elektrik alan vasıtası ile gerçekleşir.



Şekil 250. (a) Paralel iki plaka (b) bu plakalar arasında oluşan elektrik alan çizgileri

Birbirine değmeyen iki plakadan biri diğerine göre farklı gerilimle kutuplandığında plakalar üzerindeki yük dağılımı Şekil 250.b'deki gibi olur. Bu durumda (+) yükle yüklenmiş olan plakadan (-) yükle yüklenmiş plakaya doğru bir elektrik alan akışı olur. Kapasitörlerde enerji iletimi bu elektrik alan aracılığı ile gerçekleşir. Elektrik alan çizgilerinin yoğunluğu uygulanan gerilim farkının artması ile veya plakaların birbirine yakınlaştırılması ile artar. Bu durum kapasitans değerinin yükseldiğini gösterir.

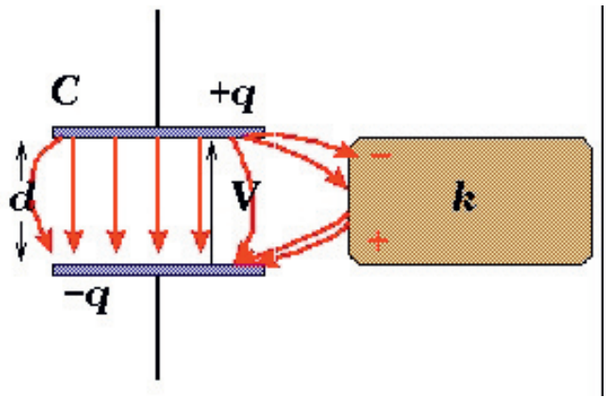
Gerilimleri farklı iki plaka arasındaki malzemenin dielektrik katsayısının büyük olması kapasitansın büyük olmasına neden olur. Dielektrik katsayısının yüksek olduğu kapasitörde iki plaka arasındaki elektrik alan çizgileri, Şekil 251.a'daki gibi daha yoğun olur.



(a) Dielektrik katsayısı yüksek (b) Dielektrik katsayısı düşük

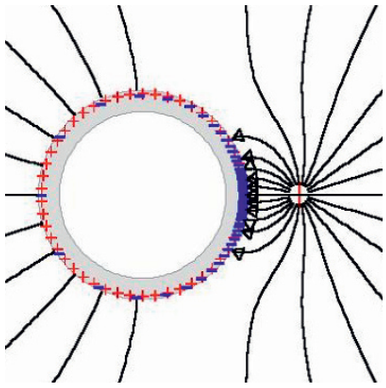
Şekil 251. İletken plakalar arasındaki yalıtkan malzemenin elektrik alan çizgilerine etkisi

Gerçekte kapasitans plakaları arasındaki elektrik alan çizgileri Şekil 251'deki gibi düzgün değildir. Plaka kenarlarında daha çok Şekil 250.b'deki gibi bozulmalar görülür. Buna ek olarak çevrede bulunan ve farklı gerilimle yüklenmiş başka iletkenler olması durumunda elektrik alan çizgilerinin bir kısmının o iletkene doğru yönelmesi de kaçınılmazdır.



Şekil 252. Farklı gerilimle yüklenmiş başka bir iletkenin etkisi

Bu durum karşılıklı iki iletken plaka arasındaki kapasitans değerini değiştirir. Örneğin Şekil 252'de görülen karşılıklı iki plaka arasındaki kapasitans ölçülmek istenseydi yanlış bir ölçüm sonucu elde edilmiş olurdu. Doğru kapasitans ölçümleri gerçekleştirebilmek için elektrik alanın kontrol altına alınması gereklidir. Aralarında elektrik alan olmayan iletkenler arasında bir kapasitanstan bahsedilemez. Elektrik alan kontrolü ekranlama (shielding) ile gerçekleştirilir. Ekranlama elemanı olarak iletken malzemeler kullanılır. Elektrik alan boşlukta ilerlerken bir iletkene rastladığında bu iletken üzerinden akmaya meyillidir. Bu iletken, kapalı bir yapıda ise Şekil 253'de görüldüğü gibi bu yapının içerisinde elektrik alan oluşmaz.



Şekil 253. Elektrik alanın ekranlanması

Eğer Şekil 252'deki plakalar Şekil 253'deki gibi ekranlanırsa dışarıda bulunan farklı gerilime sahip iletkenlerin kapasitans değerine etkisi olmayacaktır. Bir başka deyişle karşılıklı iki plaka arasında oluşan elektrik alan çizgilerinin bir kısmının başka bir iletkene yönelmesinin önüne geçilecek, böylelikle kapasitans değeri doğru bir şekilde belirlenebilecektir.

7.4.5.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

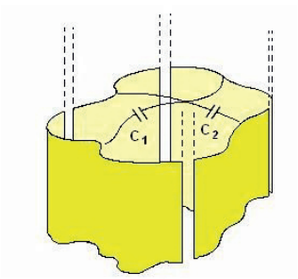
Kapasitans Biriminin Tarihçesi

Empedans birimlerinden biri olan kapasitansın elde edilişi 1957 yılına kadar o zamanın birinci seviye standardı olan hesaplanabilir karşılıklı indüktans kullanılarak yapılmaktaydı. Hesaplanabilir karşılıklı indüktans standardı hem direnç hem de kapasitans biriminin elde edilmesinde kullanılmaktaydı. En iyi kapasitans ölçümü birkaç ppm belirsizlik ile yapılmaktaydı. 1957 yılında Avustralya Metroloji Enstitüsü çalışanlarından Thompson ve Lampard'ın buluşu ile hesaplanabilir kapasitör üretildi. Direnç, indüktans ve kapasitans birimlerinin birincil seviye standardı olarak kullanılmaya başladı. En iyi kapasitans ölçümü 100 kat iyileştirildi ve 0,01 ppm seviyelerine indirildi.

Kapasitans Biriminin Güncel Tanımı

1957 yılında Avustralya Metroloji Enstitüsü'nde (CSIRO) iki araştırmacının buluşu, kapasitans ölçümlerinin $(2 - 3)\times10^{-8}$ belirsizlikle yapılabilmesinin önünü açtı [148].

CSIRO'daki bu iki araştırmacı ortaya attıkları teoriyi kullanarak 1958 yılında "Hesaplanabilir Kapasitör" ürettiler. Thompson ve Lampard'ın ortaya attıkları teoriye göre, sonsuz uzunlukta şekli önemsiz kapalı bir iletken Şekil 254'teki gibi sonsuz küçük aralıklarla 4 parçaya bölündüğünde, bu yapıda karşılıklı oluşan C_1 ve C_2 kapasitansları hakkında Eşitlik (93) yazılabilir.



Şekil 254. Sonsuz uzunluklu iletkenin dört parçaya bölünmesi

$$e^{-\pi C_1/\varepsilon_0} + e^{-\pi C_{12}/\varepsilon_0} = 1 \quad (93)$$

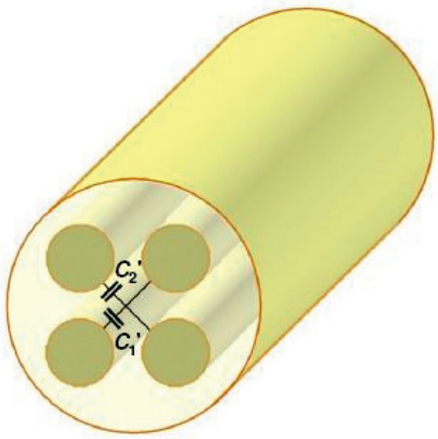
Eğer bu yapı simetrik bir yapı olursa C_1 ve C_2 kapasitansları birbirine eşit olur:

$$C = \left(\frac{\varepsilon_0}{\pi}\right) \times \ln 2 \approx 1{,}95 \text{ pF/m} \quad (94)$$

Eşitlik (94)'ten görüldüğü gibi bu teori sonucunda kapasitans değeri yalnızca uzunluk ölçümü yapılarak belirlenebilmektedir. Yapının uzunluğunun ölçülmesi kapasitans değerinin hesaplanması için yeterlidir. Bu durumda kapasitans biriminin izlenebilirliği uzunluk ölçümlerinden sağlanmaktadır.

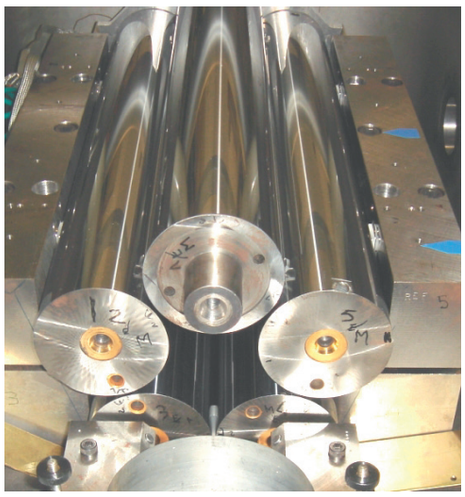
Kapasitans Biriminin Elde Edilmesi

Thompson-Lampard teorisinin hayata geçirilmesi ve bu teoriye dayanarak bir kapasitans üretilmesi 1958 yılında gerçekleştirildi. Ardından Amerikan Metroloji Enstitüsü'nden Cutkosky bu kapasitörü ayarlanabilir kapasitör olarak geliştirdi.



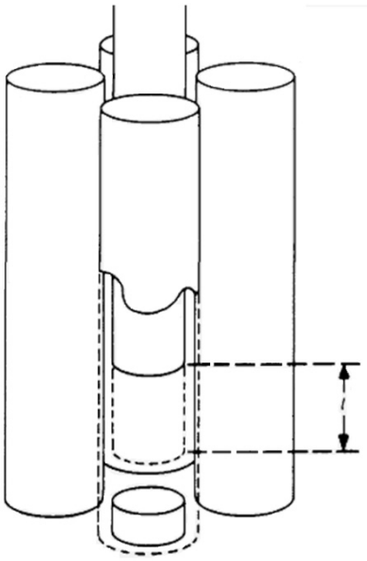
Şekil 255. Hesaplanabilir kapasitör

Thompson-Lampard teoremindeki çapraz kapasitansları elde etmek için kullanılan yapı yukarıdaki gibidir. Bu yapının gerçekleştirildiği sistem Şekil 256'da görülmektedir.



Şekil 256. Gerçekleştirilen hesaplanabilir kapasitör

Şekil 256'da kullanılan bir hesaplanabilir kapasitör görülmektedir. Bu yapının simetrik olması, çubukların pürüzsüz olması ve tüm yapının vakumda olması gerekir. Kurulması ve çalıştırılması çok zor olan bu sistem şu anda dünyada 4-5 metroloji enstitüsünde bulunur.



Şekil 257. Hesaplanabilir kapasitörün çalışması

Hesaplanabilir kapasitörde kapasitans değeri ortadaki toprak elektrodunun hareket ettirilmesi ile değiştirilir. Toprak elektrotları arasındaki mesafe kapasitans değerini belirler. Hesaplanabilir kapasitörde elde edilen kararlı kapasitans değeri 0,2 pF değerindedir.

Hesaplanabilir kapasitör, 1990 yılında Kuantum Hall direnci uluslararası direnç standardı olarak kabul görene dek direnç ve indüktans birimlerine izlenebilirliğini sağlamıştır. 1980 yılında Kuantum Hall etkisi keşfedilmiş ve yapılan çalışmalar ile Kuantum Hall DC direnç standardı oluşturulmuştur. 1990 yılından bu yana Kuantum Hall standardı DC direnç biriminin birinci seviye standardı olarak kullanılır [131]. Aynı zamanda kapasitans ve indüktans birimlerinin izlenebilirliği de Kuantum Hall standardından sağlanır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan standart, Kuantum Hall standardı olmakla birlikte direnç, kapasitans ve indüktans birimlerinin izlenebilirliği hem Kuantum Hall standardı hem de hesaplanabilir kapasitör kullanılarak elde edilir. Şu anda güncel teknolojik olanaklar ile yeni bir hesaplanabilir kapasitör yapma çalışmaları sürmektedir.

Kapasitans Biriminin Referans Standartlara Aktarılması

Hesaplanabilir kapasitör ile 0,2 pF değerinde elde edilen kapasitans değerinin 1 pF – 1000 pF aralığındaki referans standartlara aktarılması gerekir. Daha sonra bu değerler kullanılarak 10 mF değerine kadar olan çalışma standartlarının değerleri belirlenir. Değerleri belirlenen bu referans kapasitörler kullanılarak kapasitans ölçerlerin kalibrasyonu gerçekleştirilir. Böylece tüm kapasitans ölçümlerinin izlenebilirliği sağlanmış olur.

Kapasitans Karşılaştırma Köprüleri

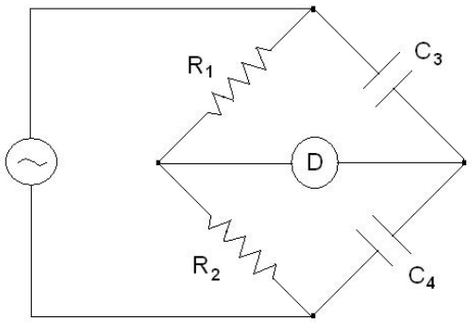
Hesaplanabilir kapasitans değeri yaklaşık olarak 2×10^{-8} belirsizlikle belirlenebilir. Bu değeri 1 pF – 1000 pF aralığındaki referans standart kapasitörlere aktarmak için ticari kapasitans ölçerler kullanılamaz. Ticari kapasitans ölçerlerin 1 kHz frekansındaki en iyi ölçüm belirsizliği 3 ppm civarındadır.

10^{-8} mertebelerinde ölçüm gerçekleştirebilmek için metroloji enstitüleri kendileri ölçüm sistemleri kurarlar. Bu sistemler karşılaştırma esasına göre ölçüm aldıklarından köprü olarak adlandırılırlar. 0,2 pF değerindeki hesaplanabilir kapasitör değeri bu karşılaştırma köprüleri yardımı ile 1000 pF değerine kadar 0,1 ppm'den daha düşük bir belirsizlikle aktarılır. Bu tür karşılaştırma köprüleri oldukça karmaşık köprülerdir.

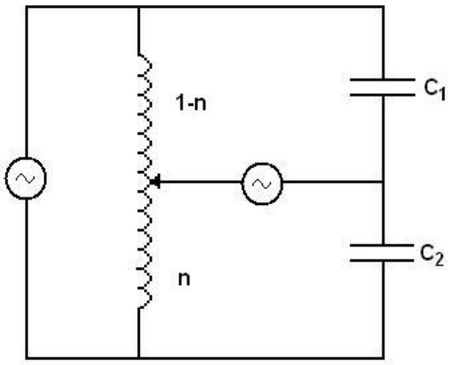
En temel kapasitans karşılaştırma köprüsü yapısı De Sauty köprüsüdür. Bu köprü yapısı Şekil 258'de görülmektedir.

Bu köprüde denge durumunda aşağıdaki eşitlik geçerli olur.

$$C_3=C_4 \cdot R_1/R_2 \qquad (95)$$



Şekil 258. De Sauty kapasitans karşılaştırma köprüsü



Şekil 259. İndüktif gerilim bölücü ile kapasitans karşılaştırması

Bu köprüde kapasitans oranı, değerleri bilinen dirençler yardımı ile belirlenir. Ancak bu köprüde sanal dengeleme yapılamadığından kapasitörün kayıp faktörü hakkında bilgi edinilemez. Kapasitörlerin kayıp faktörlerini dengelemek için C_3 kapasitörüne seri R_3 direnci, C_4 kapasitörüne seri R_4 direnci bağlanır. Bu durumda kapasitörlerin seri kayıp değerlerini de (r_3 ve r_4) içeren Eşitlik (96) yazılabilir.

$$r_4 = \frac{R_1(R_3 + r_3)}{R_2} - R_4 \qquad (96)$$

Bu tür köprüler çok yüksek doğruluk gerektiren ölçümlerde yeterli değildirler. 10^{-8} mertebesinde bir doğrulukla kapasitansları dengelemek için kullanılan dirençlerin değerlerini aynı mertebede belirlemek gerekir. Ancak hem direnç ölçümleri bu kadar iyi yapılamaz hem de kullanılan dirençlerin yapısı bu kadar yüksek doğrulukla ölçüm yapılmasına izin vermez.

Bu durumda dengeleme dirençlerine alternatif olarak kısa ve uzun dönem kararlılıkları çok yüksek, sıcaklık katsayıları düşük ve 10^{-8} mertebesinde bir doğruluk ile kalibrasyonu yapılabilen yeni bir devre elemanı gerekli olmaktadır. Bu elemanlar indüktif gerilim bölücülerdir. İndüktif gerilim bölücüler Ulusal Metroloji Enstitülerinin laboratuvarlarında çok yüksek doğruluğa sahip kapasitans karşılaştırma köprüleri kurmak için kullanılırlar. Temel devresi Şekil 259'da gösterilmiştir. Şekilde "n" denge durumunda indüktif gerilim bölücünün oranıdır. Bu karşılaştırma köprüsünde denge durumunda aşağıdaki eşitlik elde edilir.

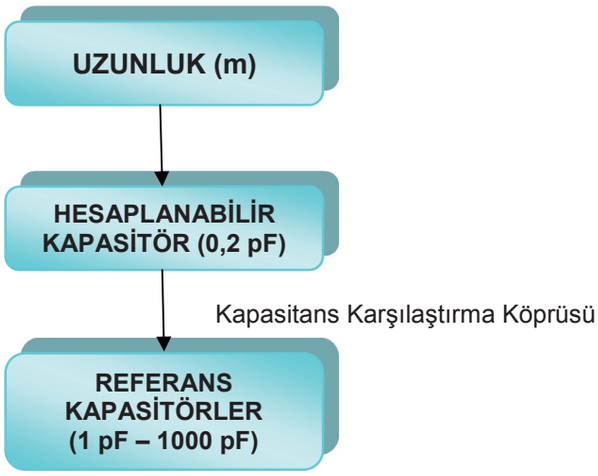
$$n_1/n_2 = C_1/C_2 \qquad (97)$$

İndüktif gerilim bölücüler kullanılarak kurulan karşılaştırma köprüleri en hassas karşılaştırma köprüleridir. Ayrıca çok hassas ticari kapasitans ölçerler de indüktif gerilim bölücüler kullanılarak üretilir.

İndüktif gerilim bölücüler uzun dönem kararlılıkları oldukça iyi, ortam sıcaklığının değişiminden etkilenmeyen cihazlardır. Doğruluk değerleri 10^{-8} seviyesindedir ve yine bu seviyelerde kalibrasyonu yapılabilen cihazlardır. Bu nedenle yüksek doğruluk gerektiren karşılaştırma köprülerinde kullanılırlar.

İzlenebilirlik Zinciri

Uzunluk ölçümleri yapılarak belirlenen hesaplanabilir kapasitör değeri, kapasitans karşılaştırma köprüleri ile 1 pF – 1000 pF aralığındaki referans değerlere aktarılır. Daha yüksek değerlerdeki standartlara da yine kapasitans karşılaştırma köprüleri ile geçiş yapılır.



Şekil 260. Kapasitans biriminin elde edilişi

7.4.5.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Elde edilen kapasitans değerlerinin uzun dönem muhafazası için yüksek kararlılığa sahip referans kapasitans standartlarına gereksinim vardır. 0,2 pF değerinde elde edilen kapasitans biriminin laboratuvarlarca kullanılan referans standartlara aktarılması gerekir.

İzlenebilirlik zincirinde değerleri doğrudan hesaplanabilir kapasitör ile karşılaştırılarak elde edilen referans standartlar en üst seviye standartlardır. Bu standartlar genellikle Fused-silica kapasitörlerdir. Kapasitörlerin içindeki yalıtkan malzeme Fused-silica isimli bir malzeme olduğundan kapasitörler de bu isimle anılmıştır.

Fused-silica kapasitörler ilk olarak NIST araştırmacılarından Cutkosky ve Lee [149] tarafından 1965 yılında geliştirildi. 0,3 ppm'den daha iyi olan yıllık kararlılık ve 3×10^{-6}'dan daha düşük kayıp faktörü değerine sahiptirler. Ancak bu kapasitörler 1 - 100 pF değer aralığında üretilebilirler. Sıcaklık katsayıları 12 ppm/°C olduğu için sıcaklık kontrollü olarak kullanılırlar.

Fused-silica standartlarından önce kullanılan referans kapasitans standartları azot dielektrikli standart kapasitörler idi. Bu kapasitörler halen birçok laboratuvarda referans standart olarak kullanılır. Ancak titreşime karşı duyarlıdırlar ve bu nedenle daha dikkatli kullanım gerektirirler. Yıllık kararlılıkları 20 ppm'den, kayıp faktörleri de 10×10^{-6}'dan düşüktür. Bu tür kapasitörler de ancak 1000 pF değerine kadar üretilebilirler.

1000 pF değerinin üzerindeki referans standart kapasitörler mika dielektrikli kapasitans standartlarıdır. 10 µF değerine kadar üretilebilirler. 10 µF değerinin üzerindeki kapasitans standartları polikarbonat kapasitörler kullanılarak yapılırlar.

2-Uçlu Ölçüm

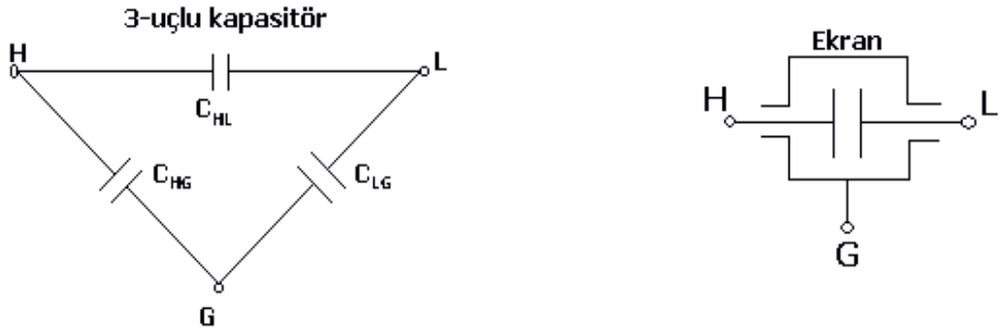
Ölçüm cihazından gelen ekransız iki kablo ile yapılan kapasitans ölçümüdür. 2 uçlu kapasitans ölçümü, doğruluğu en düşük kapasitans ölçümüdür. 0 – 1000 pF aralığındaki kapasitörlerin düşük doğruluklu ölçümleri ile 1 µF ve üzeri kapasitörlerin yüksek doğruluklu ölçümleri bu yöntemle gerçekleştirilebilir. 2 uçlu ölçümde gerek ölçüm kablolarından gerekse ölçümü yapılan kapasitörden gelen birçok istenmeyen kapasitans, ölçüm sonucunu etkiler. Bu nedenle ölçülecek kapasitör bağlanmadan önce kablolardan gelecek olan açık devre kapasitansının belirlenmesi önemlidir.

Bu tür ölçüm yapan cihazlar genelde ucuz ve karmaşık olmayan cihazlardır. Eğer kullanıcı çok hassas ölçüm almayacaksa (yukarıda bahsedilen hata miktarı yeterli ise) ölçümler hızlı bir biçimde alınabilir.

3-Uçlu Ekranlı Ölçüm

2 uçlu ölçüm yöntemi, kapasitans ölçerken çevresel etkenlerin ölçüm üzerinde etkili olduğu bir yöntemdir. Bu etkilerin kapasitans ölçümüne etkisi, ölçülen kapasitans değerine bağlıdır. Kapasitans değeri arttıkça hata etkisinin azalır.

Çevresel kaynaklardan gelen elektrik alanın ölçmek istediğimiz kapasitans üzerinde etkili olmasının önüne geçebilmek için ölçümü yapılan kapasitörün Şekil 253'deki gibi ekranlanması gereklidir. Kapasitörü ekranlayan bu yapı kapasitörün H ve L uçlarına bağlanmaz, ayrı bir uç olarak kullanılır ve G ucu olarak adlandırılır. Böylece kapasitör yapısı üç uçlu hale gelir.



Şekil 261. 3 Uçlu kapasitör gösterimi ve kapasitanslar

3 uçlu kapasitans yapısında çevreden kaynaklanan elektrik alan kutu içerisinde herhangi bir etkide bulunmamaktadır. Böylece tüm istenmeyen kapasitanslar (yani elektrik alan) kutu içerisinde hapsedilmiş olur ve değeri değişmez.

Hassas kapasitans ölçüm cihazları, C_{LG} ve C_{HG} kapasitanslarını yok edecek şekilde tasarlanır. 3 uçlu bağlantıda H ucuna gelen kablonun ekranı kapasitansın kutusuna bağlı değildir. Yalnız L ucuna gelen kablo kutuya bağlıdır.

3-uçlu ölçüm, elektriksel ekran sürekliliği göstermediğinden manyetik ekranlama gerçekleşmemektedir. Bu durumda standardın çektiği akımın yükseldiği yüksek kapasitans ve yüksek frekans değerleri için bu yöntemin kullanılması uygun değildir.

2-Uçlu Ekranlı Ölçüm

3 uçlu ölçüme göre çok küçük bir farkı vardır ve daha yaygın olarak kullanılan bağlantı şeklidir. 3 uçlu ölçüme göre farkı ekranın sürekli olmasıdır. Böylece hem H ucuna hem de L ucuna bağlanan kablo ekranları kutuya bağlanmaktadır. İngilizce literatürdeki ismi "2 terminal pair" olarak geçmektedir.

Bu bağlantı şekli ile ölçüm sisteminde ekran kesintisiz olarak devam eder. Bunun sonucu olarak 2 uçlu ekranlı yöntemde çevresel elektrik alan etkisi ile beraber çevresel manyetik alan etkisi de yok edilmiştir. Ölçüm sistemi ile kapasitör arasındaki ekran kesintisiz olarak devam ettiğinden canlı uçtan gelen akımın ekran üzerinden geri dönmesi sağlanır. Bu akımlar birbirine eşit olduğunda, aynı zamanda ters yönde olduklarından, üretilen net manyetik alan sıfır olacaktır. Burada karşılıklılık ilkesi devreye girer: "Eğer bir sistemin içerisindeki akımlar sistem dışında net bir manyetik alan üretmiyorsa, sistemin dışında üretilen manyetik alanlar da sistemin içerisindeki akımlara etki etmezler". Bu nedenle 2 uçlu ve ekranlı ölçüm sistemleri hem doğruluğu hem de kararlılığı yüksek sistemler olarak karşımıza çıkar.

Bu köprüler kullanılarak 10^{-7}'den daha iyi doğruluğa sahip kapasitans ölçüm sistemleri üretilebilir. Bu yöntem kullanılarak ticari olarak üretilip satılan en iyi ölçüm sistemi belirsizliği 3×10^{-6} seviyesindedir.

2-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi daha çok yüksek değerli empedanslar için kullanılan bir yöntemdir. 2-uçlu bağlantı olması nedeniyle kablo empedanslarının ölçüm sonucuna etkisi vardır. Ancak düşük değerli kapasitans ölçümlerinde (1 – 1000) pF empedans değerleri yüksek olduğundan kablo etkileri ihmal edilebilir. Ayrıca bu yöntemde ölçüm doğruluğu ve kararlılığı kabloların konumu ile ya da hareket etmesi ile değişmez.

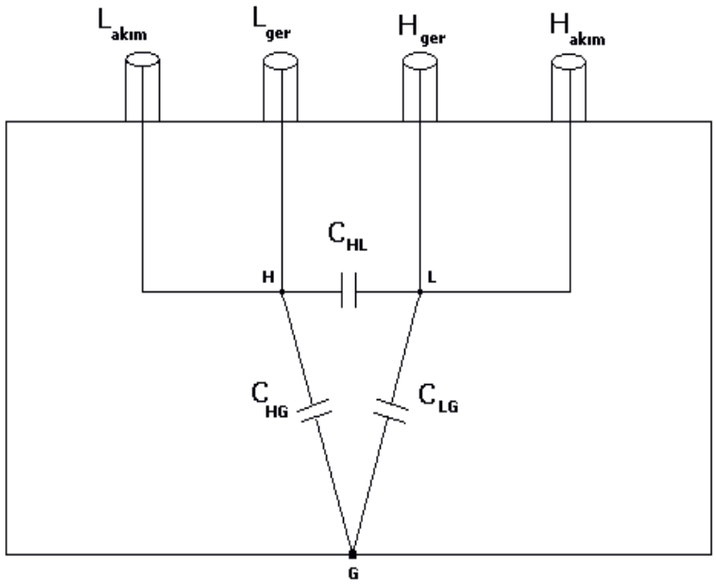
Ölçüm frekansı yükseldikçe kapasitörlerin empedansı da düşer. Bu durumda 2-uçlu ekranlı ölçümde kablo empedansları ölçüm doğruluğunu olumsuz yönde etkilemeye başlar. Bu nedenle genellikle 100 kHz'e kadar olan ölçümlerde kullanılan bu yöntem yüksek frekans kapasitans ölçümlerine uygun değildir. Bunun için bir sonraki bölümde anlatılan 4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi kullanılır.

4-Uçlu Ekranlı Ölçüm

İngilizce literatürdeki ismi "4 pair" olarak geçen bu ölçüm yöntemi NIST araştırmacısı Cutkosky tarafından geliştirilmiştir [150]. Bu ölçme yönteminde düşük frekans ölçümlerine ek olarak 100 kHz üzeri frekanslarda da yüksek doğruluğa sahip kapasitans ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. DC direnç ölçümlerinde 4-uçlu, ölçüm düşük değerli dirençlerin daha iyi doğrulukla ölçülmesi için kullanılır. Bu yöntemin kapasitans ölçümlerinde kullanılma mantığı da aynıdır. Çünkü bir kapasitansın empedansı;

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \tag{98}$$

olarak verilmektedir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi frekans değeri yükseldikçe kapasitörün empedans değeri düşer. Bu durumda kullanılan kabloların empedansı ölçüm sonucunu doğrudan etkileyecek, bu nedenle 2-uçlu ekranlı ölçüm yönteminin ölçüm hatası artacaktır.



Şekil 262. 4 Uçlu ekranlı bağlantı şekli

Düşük değerli empedansların ölçümünde kablo empedansının dışında ortaya çıkan bir sorun daha vardır. Empedans değeri düştükçe ölçüm devresinin kapasitansa uyguladığı akım miktarı artar. Bu durum, akım kollarında akan akımın gerilim kollarında akım indüklemesine neden olur. Fakat 4 uçlu ekranlı ölçüm yönteminde canlı uçtan geçen akım, ekran üzerinden geri akar. Bu durumda oluşan net manyetik alan sıfırlanmış olur. Böylelikle gerilim kolları üzerinde akım indüklenmesinin önüne geçilmiş olur. Bunun sonucu olarak 4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi en geniş empedans aralığında ölçüm alınmasını sağlar.

4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi çok geniş bir empedans aralığında doğru ölçüm almak için uygun bir yöntemdir. Fakat kapasitörlerin 50 Hz ile 10 - 20 kHz frekansına kadarki ölçümlerinde kullanılan en hassas ölçüm cihazları 2-uçlu ekranlı ölçüm cihazlarıdır. Çünkü bu frekans değerlerinde (0 – 1000) pF aralığındaki kapasitörlerin empedans değerleri 2-uçlu ekranlı ölçüme daha uygundur. Manyetik alan ve elektrik alana karşı bağışık ölçüm sistemleridir.

7.4.6 ELEKTRİKSEL GÜÇ VE ENERJİ

7.4.6.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Elektriksel aktif güç, genel durum için aşağıdaki gibi tanımlanır [151]:

$$P=\frac{1}{T}\int_T U \times I \times dt \tag{99}$$

Burada, U gerilim, I akım, T ise gözlem süresi veya periyodik sinyaller için periyot süresidir. İdeal güç sistemlerinde, gerilim ve akımlar 50 Hz frekansında sinüs dalga formundadırlar. Bununla birlikte, pratikte güç sistemlerinin bileşenlerinin ideal olmayan karakteristikleri ve ideal olmayan yükleri bozulmaya neden olur. Böylece, akım ve gerilim sinyalleri sinüsten farklı formlara sahip olur ve harmonik bileşenler taşırlar. Birçok durumda, akım ve gerilimler 50 Hz'lik bir temel frekans ile (yaklaşık olarak) periyodik olmaya devam edeceklerdir. Eğer, gerilim ve akım, aynı T periyodu ile zamanın periyodik fonksiyonları ise, hem gerilim hem de akım, Fourier serileri olarak tanımlanabilir ve güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P=\sum_n U_n \times I_n \times \cos\varphi_n \tag{100}$$

n; gerilim ve akım harmoniklerinin bulunduğu seviyedir, φ_n ise u_n ile i_n arasındaki faz açısı farkıdır. Hem gerilim hem de akımın sinüzoidal olduğu özel durum için, aktif güç aşağıdaki benzer denklemle ifade edilebilir:

$$P = U \times I \times \cos\varphi \tag{101}$$

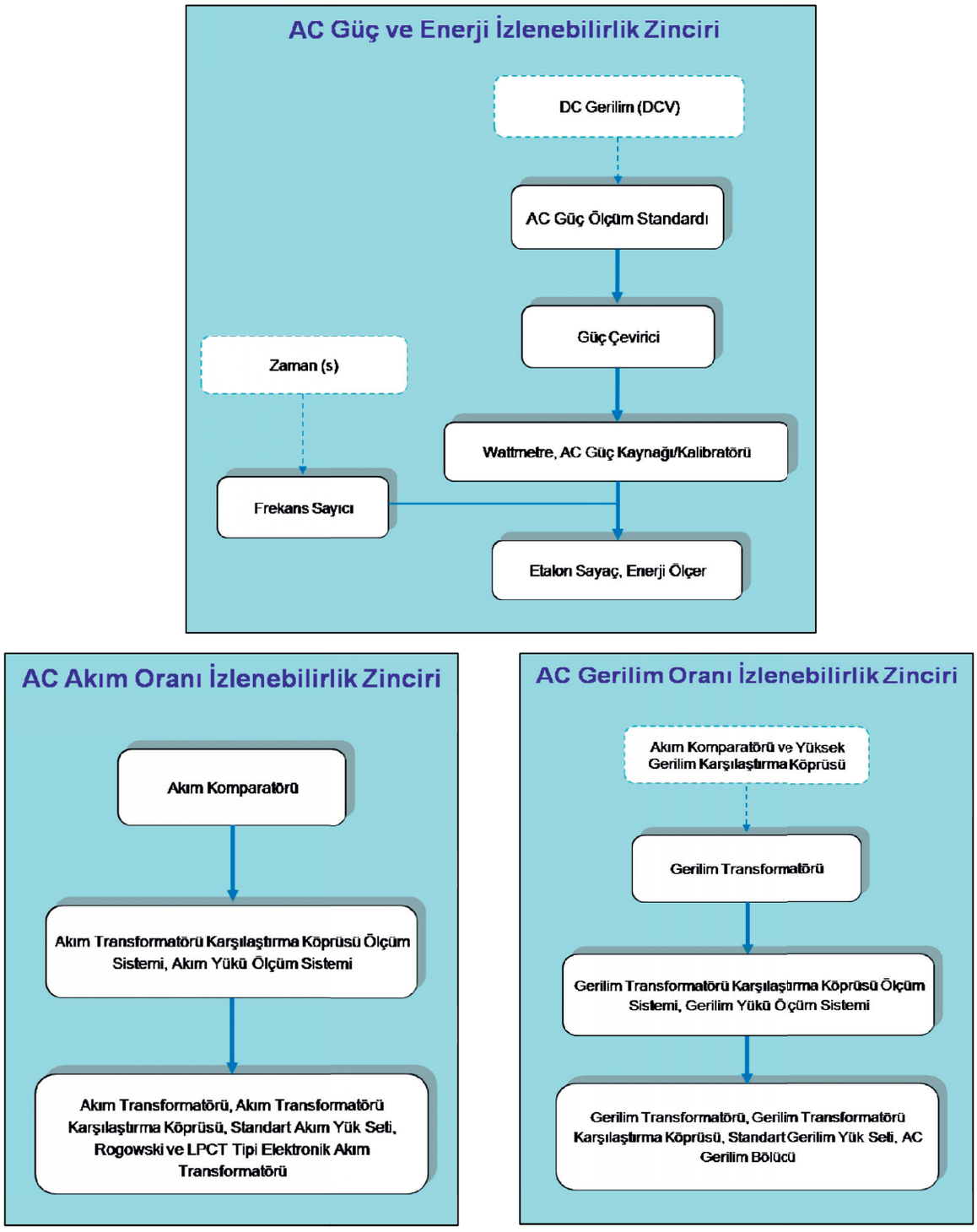
Bu tanımlamalar elektriksel güç ve enerjinin fiziksel doğası üzerine kurulmuştur. Bu güç ve enerji, örneğin termal güç ve enerjiye transfer edilebilir ve termal veya mekaniksel özellikler olarak ölçülebilir. Dolayısıyla, Eşitlik(99)'dan (101)'e kadar, sinüs, sinüs olmayan ve periyodik sinyallerin, ne genel durumu ne de özel durumları için herhangi bir tartışmaya ihtiyaç yoktur.

Diğer taraftan, görünen güç ve reaktif güç, aktif güçte olduğu gibi basit, iyi tanımlanmış bir fiziksel yapıya oturtulmamıştır. Bunlar, sinüs ve sinüse yakın şartlar için faydalı olan geleneksel olarak tanımlanmış büyüklüklerdir. Sinüzoidal gerilim ve akımlar için reaktif ve görünür güç sırasıyla aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanmaktadır:

$$Q = U \times I \times \sin\varphi = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{102}$$

$$S = U \times I = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{103}$$

Reaktif güç, herhangi bir fiziksel fenomen ile tanımlanan bir büyüklük değildir. Fakat sinüs şartlarında çok yararlı bazı karakteristikleri olan ve fiziksel yorumları bulunan, matematiksel olarak tanımlanmış bir büyüklüktür.



Şekil 263. Güç ve enerji birim ve alt birimlerinin elde edilmesi ve dağıtımı

7.4.6.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

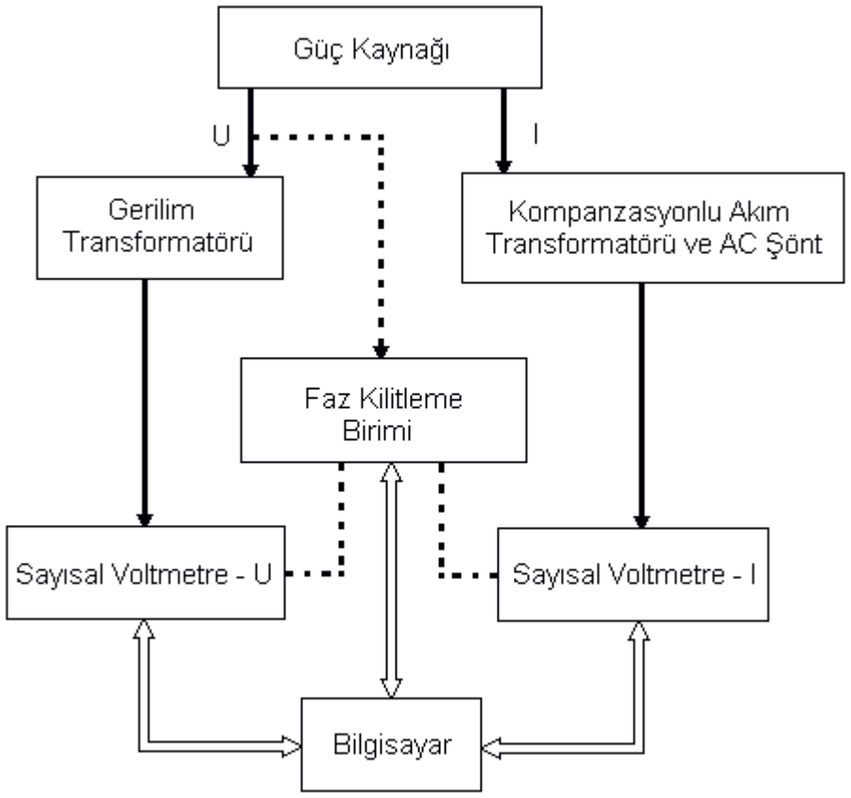
Elektriksel güç ve enerji ölçümleri üç ana grupta toplanmakta olup elektriksel güç ve enerjinin bu üçayağı için ayrı ayrı standart ve ölçüm yöntemleri geliştirilir.

- Güç Ölçüm Standartları ve Yöntemleri
- Akım Oranı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri
- Gerilim Oranı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Güç Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Sayısal Örnekleme ile Güç Ölçümü [152]

Gerilim ve akımın sayısal örneklenmesine dayanan elektriksel güç ölçümünün avantajı; kalibrasyonun kolay olması ve sayısal çarpmanın hassas olmasından dolayı, analog çarpma prensibiyle çalışan güç ölçüm cihazlarında oluşan doğrusallık problemlerinin oluşmamasıdır. Ayrıca, sinüs olmayan şartlar için de doğru güç ölçümlerine olanak sağlamakta ve farklı harmoniklerin gücünün hesaplanmasını mümkün kılmaktadır.

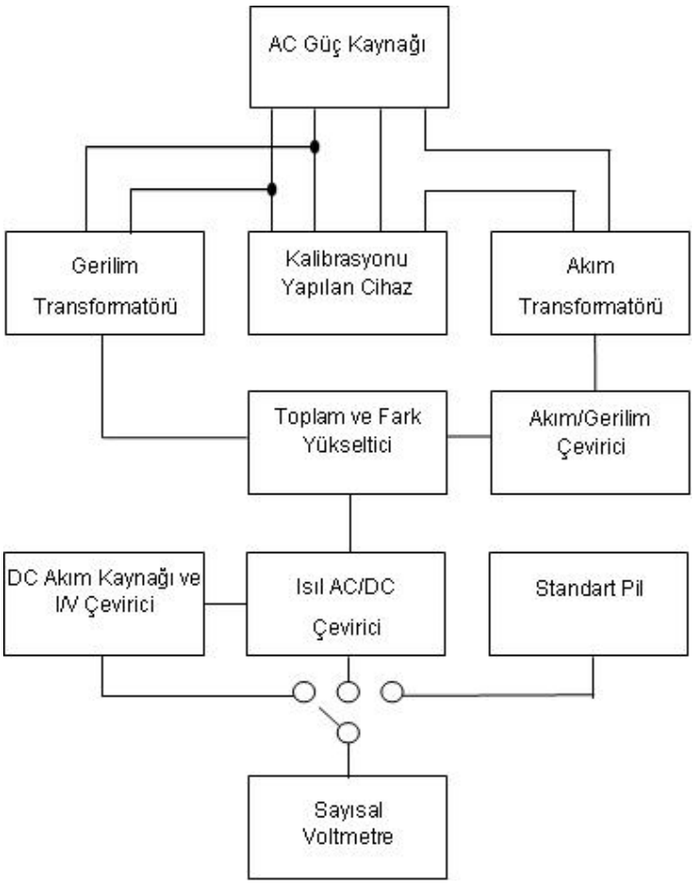


Şekil 264. Sayısal örnekleme ile güç ölçüm sisteminin blok diyagramı

Sayısal örnekleme prensiplerine göre çalışan bu sistemin en önemli parçası Analog-Sayısal Çeviricilerdir (ADC'ler). Bunlar sayısal multimetreler olduğu için DMM-U ve DMM-I ile temsil edilir. Giriş gerilimini DMM-U'nun uygun ölçüm bölgesine kadar düşürebilmek için gerilim transformatörü, giriş akımını DMM-I'nın uygun ölçüm bölgesine dönüştürmek için ise akım transformatörü ve yük kullanılır. Sistemdeki ADC'lerin senkronize çalışması için bir senkronizasyon kutusu ve hem cihazların kontrolü hem de DMM-U ve DMM-I'dan alınan örneklerin işlenmesi için bir bilgisayar kullanılmaktadır.

Çok Eklemli Isıl Çeviriciler ile Güç Ölçümü

Bu güç ölçüm yöntemi, içerisinde bulunan ve termal AC/DC transfer prensiplerine göre çalışan 2 adet MJTC (Multijunction Thermal Converters – Çok Eklemli Isıl Çeviriciler) üzerinden "Toplam ve Fark" yöntemi ile aktif güç (P) ölçen tek-fazlı bir sistemdir. Sistemde yer alan ve sistemin ana kısmını teşkil eden MJTC'lerin her biri ayrı ayrı ve aynı anda, uygulanan AC akım ve AC gerilim sinyallerinin gerçek değerini bulmakta kullanılmakta, bulunan bu değerler ile de "Toplam ve Fark" yöntemi ile ölçülecek aktif gücün (P) gerçek değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 265. MJTC'lı güç ölçüm sisteminin blok diyagramı

Akım ve gerilimden elde edilen AC gerilim sinyalleri ($+U_I$, $-U_I$ ve U_U), uygun kombinasyonlarda özel olarak tasarlanmış toplam ve fark yükselticilerine aktarılmak suretiyle yükseltici çıkışlarında toplam ($U_U + U_I$) ve fark ($U_U - U_I$) sinyalleri elde edilir. Bu toplam ve fark sinyalleri MJTC'lere uygulanıp standartların çıkışlarında oluşan gerilimler sistemde yer alan nanovoltmetreler ile okunur. Daha sonra kalibreli bir DC kaynaktan elde edilen DC akımlar akım/gerilim çevirici üzerinden MJTC'lere uygulanıp aynı çıkış gerilimleri elde edilene kadar kaynak üzerinde ayarlama yapılır. Aynı işlemler DC akım polaritesi değiştirilip tekrarlanır. MJTC çıkışlarında AC toplam ve fark sinyallerinin yarattığı gerilime eşit veya ona çok yakın bir gerilim yaratan DC kaynak akımlarının gerçek değerleri bir standart direnç veya kalibreli akım şöntü kullanılarak saptanır.

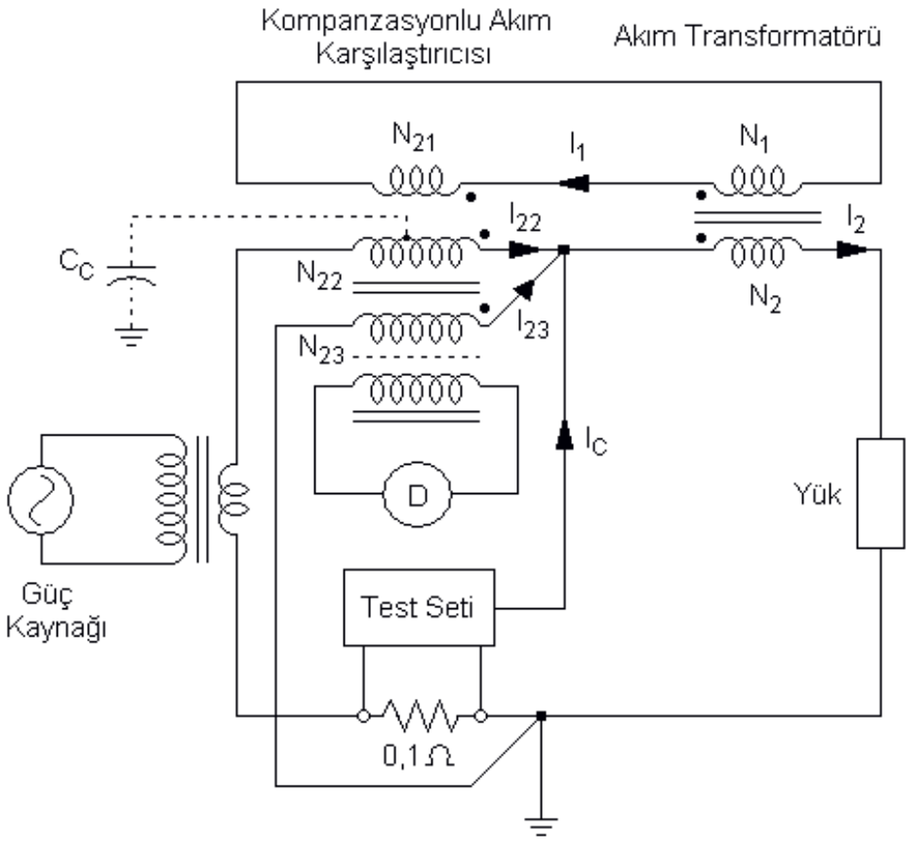
Bu şekilde değerleri saptanan ($U_u + U_I$), ve ($U_u - U_I$), değerleri kullanılarak, Eşitlik (103) ile aktif güç (P) değeri hesaplanır:

$$P = \frac{1}{4}\left[(U_U + U_I)^2 - (U_U - U_I)^2\right] \qquad (104)$$

Akım Oranı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri [153]

Akım transformatörü ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan yöntem; ölçümü yapılacak olan akım transformatörünün bir standart akım transformatörü ile karşılaştırılmasıdır. Bir karşılaştırma köprüsü yardımıyla, belirlenen iki akım transformatörü arasındaki oran hatası ve faz açısı değerleri, ölçümü yapılan akım transformatörünün hatası olarak belirlenir.

Kalibre edilen transformatörün primer sargısı N_1 ve akım komparatörünün primer sargısı N_{21} seri olarak, sekonder sargılar olan N_2 ve N_{22}'de birbirlerine seri olarak bağlanır. Bunlara ek olarak, kompanzasyon sargısı N_{23} ve test set'in çıkışı, N_2 ve N_{22} sargılarının birleşme noktalarına bağlanmaktadır. Güç kaynağı ve köprünün girişi için gerekli olan akım, dört terminalli AC akım şöntü ile sekonder sargılarına seri olarak bağlanır. Test transformatörü için herhangi bir düzeltme akımına ihtiyaç yoksa test transformatörünün sekonder akımı, kompanzasyonlu akım komparatörünün sekonder akımı ile kompanzasyon akımının toplamına eşit olacaktır.



$$N_{23} = N_{22}$$

$$N_{22} / N_{21} = N_2 / N_1 = n$$

$$I_1 / I_2 \approx n[1 - I_C / (I_{22} + I_{23})]$$

$$\approx n[1 - I_C / I_2]$$

C_C : Kapasitif Hata Kompanzasyonu

Şekil 266. Sekonder beslemeli kompanzasyonlu akım karşılaştırıcısı kullanılarak yapılan akım transformatörü kalibrasyon sistemi

$$I_2=I_{22} + I_{23} \quad (105)$$

Eşitlik durumunda yani dedektörde "0" gözlendiğinde, test set'in çıkışındaki düzeltme akımı I_C de "0" olmalıdır. Eğer test transformatörü önemli bir düzeltmeye sahipse, test transformatörünün sekonder akımı I_2 aşağıdaki formüle eşit olacaktır.

$$I_2=I_{22} + I_{23} + I_c \quad (106)$$

I_2 sekonder akımı;

$$I_2 = I_1 / [n (1 + a) e^{-jb}] \; I_2 \approx I_1/ [n (1 + a - jb)] \quad (107)$$

ile elde edilebilecektir. Anma sekonder akım değeri, akım komparatörünün sekonder akımı I_{22} ile kompanzasyon akımı I_{23}'ün toplamına eşit olacaktır.

$$I_{22} + I_{23} = I_1 / n \quad (108)$$

Değeri küçük olan düzeltme akımı I_c, anma sekonder akımın ayarlanabilir oranı şeklinde ifade edilebilmektedir:

$$I_c = (I_1 / n) (-\alpha + j\beta) \quad (109)$$

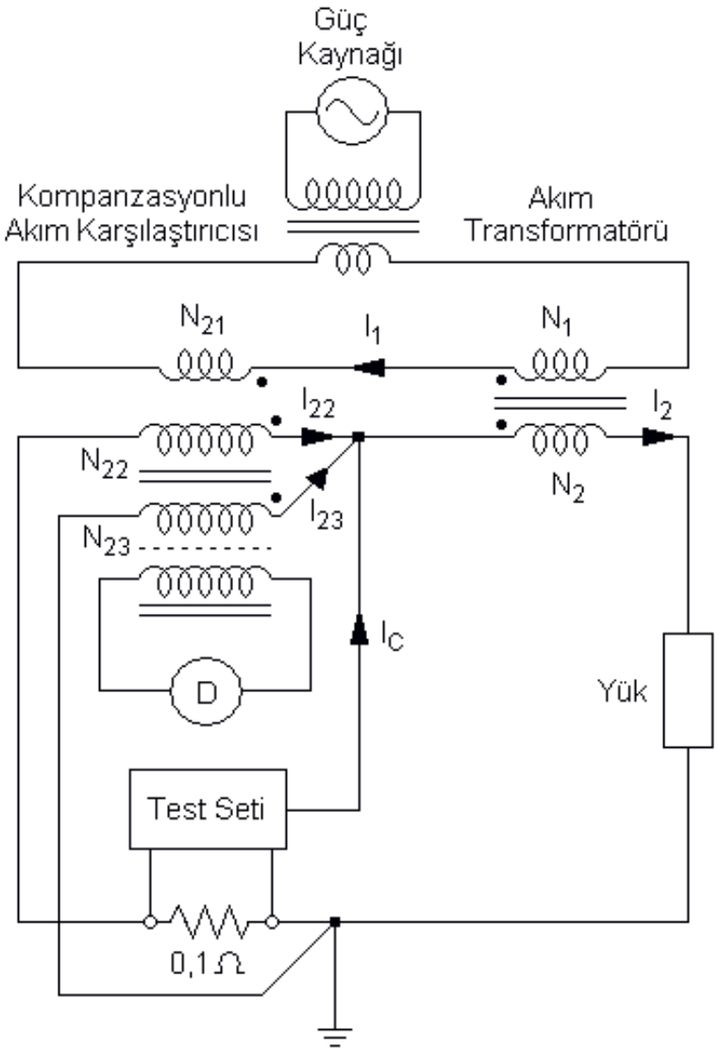
Eşitlik (107) ve (108), (109)'da yerlerine konursa;

$$1 / (1 + a – jb) = 1 - \alpha + j\beta \quad (110)$$

elde edilir. Eğer düzeltme akımı küçükse, $a \approx \alpha$ ve $b \approx \beta$ olacaktır. Köprünün ayar kademeleri olan α ve β, test transformatörünün oran hatasını ve faz açısını doğrudan okuyabilmek için tasarlanmaktadır.

Şekil 266'da gösterilen akım transformatörü kalibrasyon sistemi, genelde primer akım bölgesi 5 A ile 1200 A (nominal oranlar 1:1 ile 240:1 arasında) olan akım transformatörlerinde kullanılır. Bu devre, transformatörlerin sekonder sargılarına akım verildiği için sekonder beslemeli devre olarak adlandırılır. Güç kaynağı sadece sekonder akımı sağlamak için kullanılır. Normal şartlar altında sekonder akım 5 A değerinin geçmez. Ancak gerilim, özellikle büyük oranlarda ve yüksek primer akımlarında, yüksek olabilir.

Kompanzasyonlu akım komparatörü bu devrede, hem hassas bir oran cihazı hem de sekonder sargıdan primer sargıya bir güç sağlayıcı olarak kullanılır. Primer devrede güç ihtiyacı sekonder devreden daha büyüktür. Bu yüzden sekonder beslemeli devrede, kompanzasyonlu akım komparatörü fazla güç üretmelidir. Bu güç dönüştürme işlemi ölçme sistemlerinde büyük hatalara sebebiyet verir. Sekonder sargıda meydana gelen yüksek gerilim kapasitif akımların oluşmasına neden olur. Bunun sonucunda, akım komparatörünün akım oranında hata oluşmaktadır. Sekonder beslemeli devrede, kompanzasyon akımı sekonder sargıların birleşme noktasında yüksek gerilime neden olmaktadır. Bütün bu sorunlara rağmen, ortaya çıkan hatalar akım komparatöründe kontrol altına alınabilir. Akım kaynağının primer devreye bağlandığı, primer akımı 1200 A'den büyük olan test transformatörleri için Şekil 267'deki devre kullanılmaktadır.



$$N_{23} = N_{22}$$

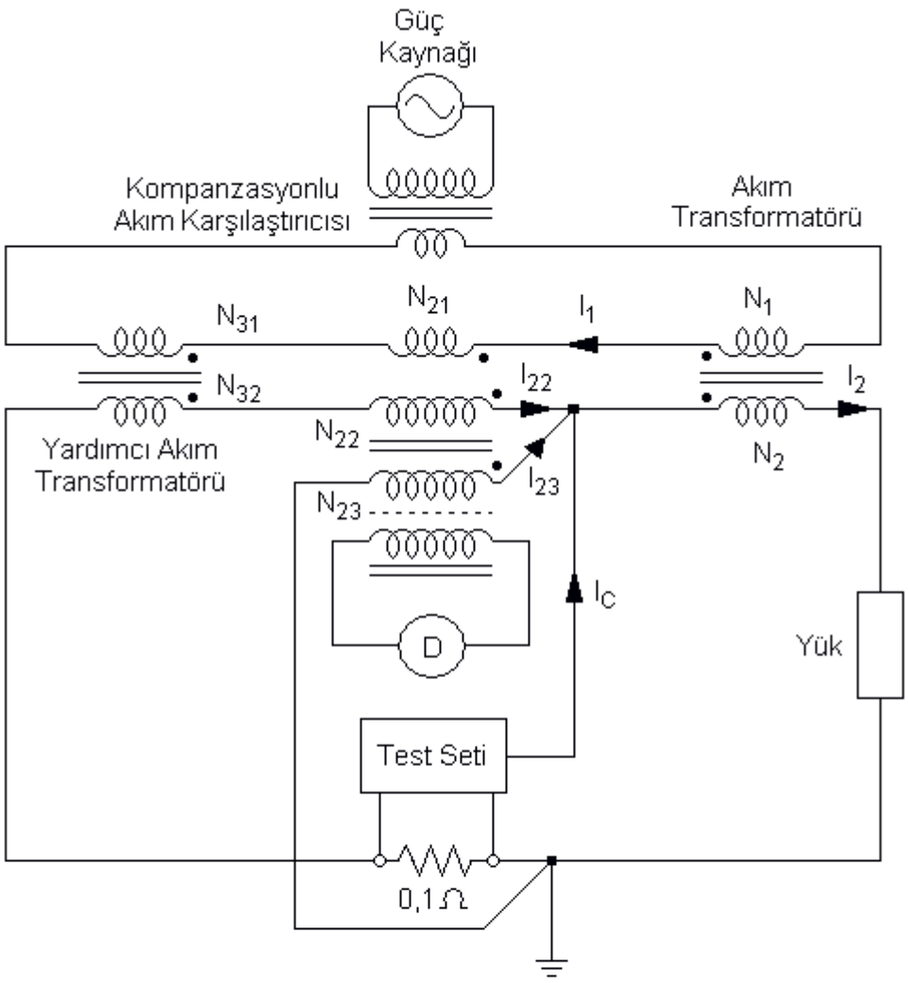
$$N_{22} / N_{21} = N_2 / N_1 = n$$

$$I_1 / I_2 \approx n[1 - I_C / (I_{22} + I_{23})]$$

$$\approx n[1 - I_C / I_2]$$

Şekil 267. Primer beslemeli, kompanzasyonlu akım karşılaştırıcısı kullanılarak yapılan akım transformatörü kalibrasyon sistemi

Primer beslemeli bu devre yardımıyla birkaç bin ampere ulaşan primer akımlar için oldukça doğru ölçümler yapılabilmektedir. Empedansın büyük olmasından dolayı primer sargıda büyük kapasitif akımlar oluşur. Bu problemin üstesinden gelebilmek için Şekil 268'de gösterildiği gibi yardımcı bir akım transformatörü kullanılır. Bu transformatör sekonder devreye gereken ek gücü sağlamak için kullanılmaktadır. Böylece, kompanzasyonlu akım komparatörünün performansı artırılmış olur.



$$N_{23} = N_{22}$$

$$N_{22} / N_{21} = N_{32} / N_{31} = N_2 / N_1 = n$$

$$I_1 / I_2 \approx n[1 - I_C / (I_{22} + I_{23})]$$

$$\approx n[1 - I_C / I_2]$$

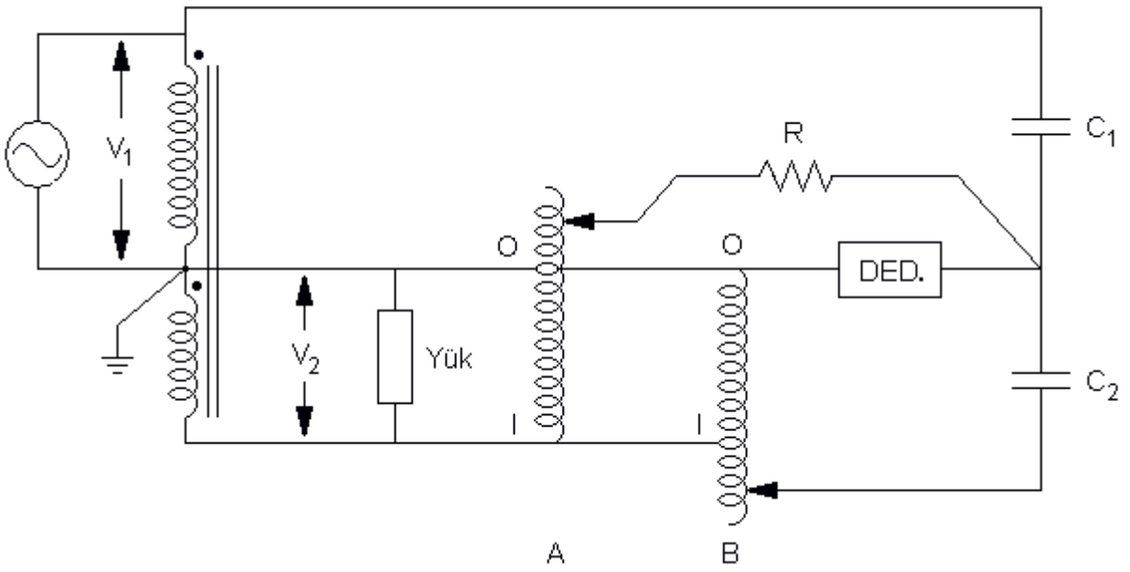
Şekil 268. Yardımcı transformatör ve kompanzasyonlu akım komparatörü kullanılarak yapılan akım transformatörü kalibrasyon sistemi

Gerilim Oranı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Gerilim transformatörlerinin oran hatası ve faz kaymasını ölçmek için kullanılan yöntemler [154]:

Kapasitif Bölücü Yöntemi

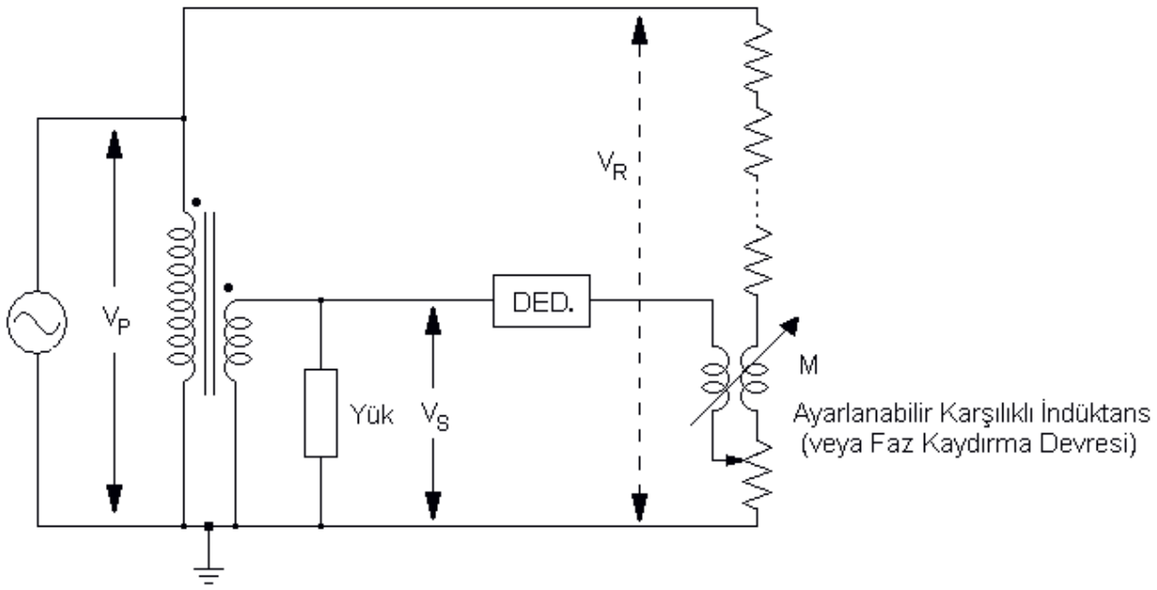
Bu yöntemin devre şeması Şekil 269'da gösterilmiştir. Gerilim transformatörünün primer sargısı C_1 kapasitörüne, sekonder sargısı ise C_2 kapasitörüne bağlanır. Oran ve faz kayması dengesi iki indüktif gerilim bölücü tarafından sağlanır. Oran dengesi için B bölücüsü kullanılır. Faz kayması dengesi ise A bölücüsü tarafından yüksek değerdeki direnç üzerinden küçük bir akım geçirilerek elde edilir.



Şekil 269. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Kapasitif bölücü yöntemi

Rezistif Bölücü Yöntemi

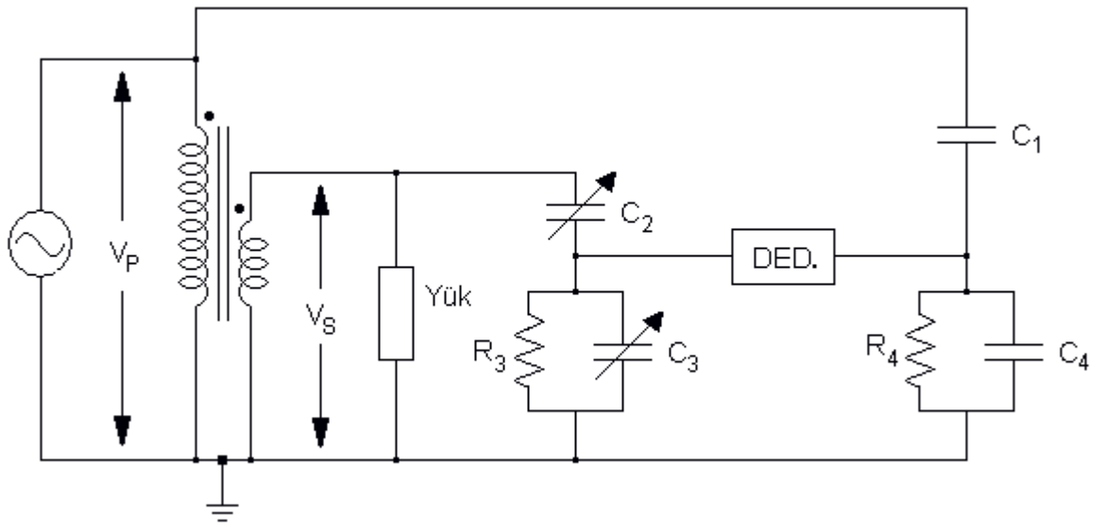
Rezistif bölücü yönteminin devre şeması Şekil 270'de gösterilmiştir. Karşılıklı indüktörün primeri ile seri bağlı olan dirençler gerilim transformatörünün primer sargısına bağlanmaktadır. Gerilim transformatörün sekonder sargısı karşısındaki eşit genlikli ve ters işaretli gerilim, dedektörü sıfırlamak için, M karşılıklı indüktör ve R direnci ayarlanarak sağlanmaktadır.



Şekil 270. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Rezistif bölücü yöntemi

Pseudo Köprüsü Yöntemi

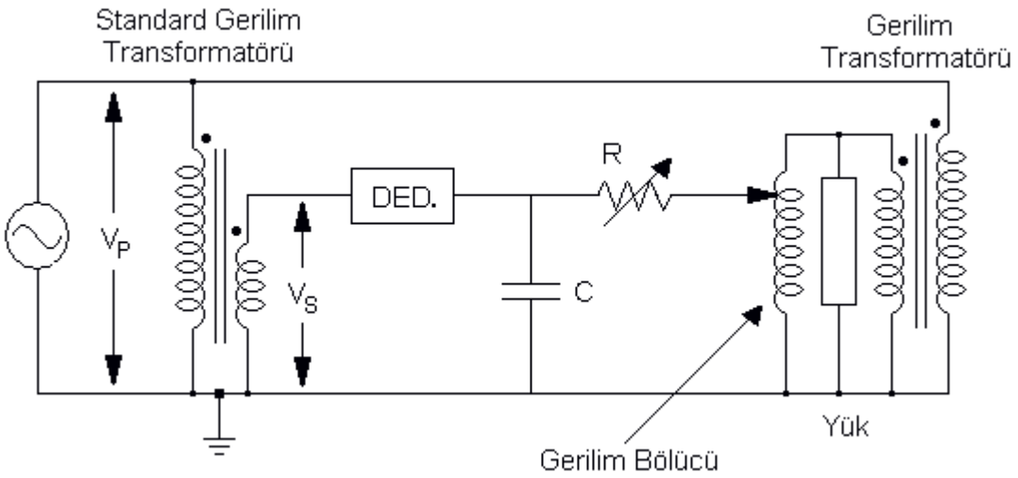
Pseudo-Köprüsü yönteminin devre şeması Şekil 271'de gösterilmiştir. Bu köprüde denge C_2 ve C_3 kapasitörleri ayarlanarak elde edilir. Düşük belirsizlik için uygun ekranlama ve doğru bir ekran potansiyeli gerekir.



Şekil 271. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Pseudo köprüsü yöntemi

Karşılaştırmalı Dengeleme Yöntemi

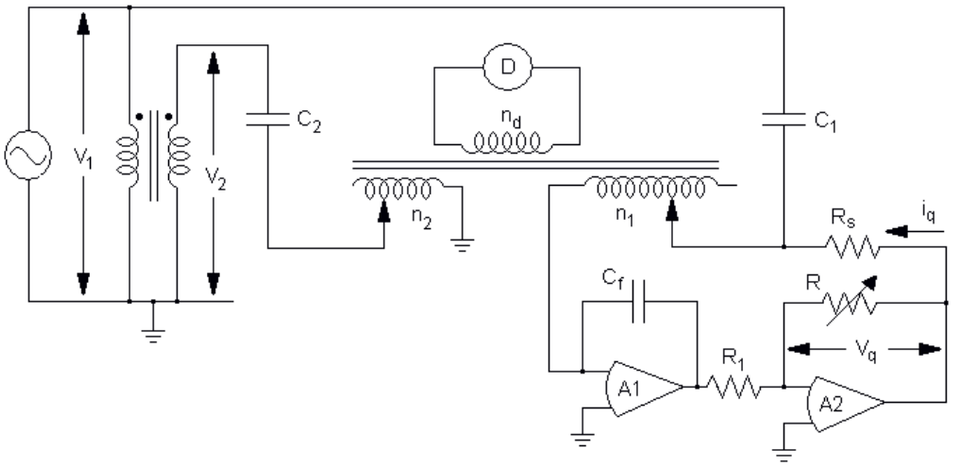
Karşılaştırmalı dengeleme yöntemi, gerilim transformatörünün oran ve faz hatasını, hatası bilinen bir referans ya da standart transformatör ile karşılaştırarak belirler. İki transformatörün primer gerilimleri paralel olarak ortak bir kaynağa bağlanır. Ölçümler ise transformatörlerin sekonder gerilimleri taraflarında gerçekleştirilir. Bu dört sargının bir uçları ortak bir toprak noktasına bağlanmaktadır.



Şekil 272. Gerilim transformatörü kalibrasyon sistemi - Karşılaştırmalı dengeleme yöntemi

Akım Komparatörü Kapasitans Oran Yöntemi

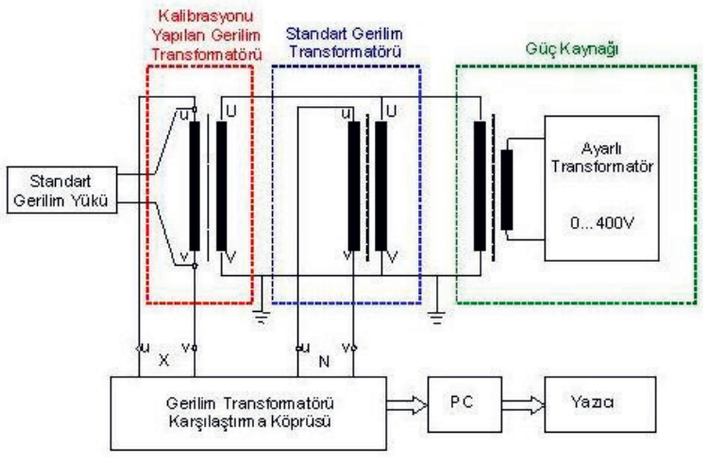
Gerilim transformatörü kalibrasyonunu gerçekleştiren temel devre Şekil 273'de gösterilmiştir. Düşük kayıplı C_1 ve C_2 kapasitansları, birbirlerine ters polaritede bağlanmış primer ve sekonder sargıların gerilimlerine sırasıyla bağlanır. Akım komparatörü manyetik bir nüve üzerine sarılmış üç adet sargıdan oluşur. Oran dengesinde, N_2 sargısı kaba ayarın yapılmasını N_1 sargısı ise hassas ayarın yapılmasını sağlar. Ayarlanabilir R direncinin karşısındaki A_1 ve A_2 işlemsel yükselticileri V_1 ile orantılı ve V_1 ile aynı fazda olan V_q gerilimini üretirler. V_q gerilimi R direnci ile orantılı bir i_q akımını, faz dengesini sağlaması için, N_1 sargısına enjekte etmektedir. Amper-sarım dengesi N_D sargısına bağlanmış D null dedektör ile gösterilmektedir.



Şekil 273. Gerilim transformatörü kalibrasyonu - Akım komparatörü kapasitans oran yöntemi

Karşılaştırma Yöntemi

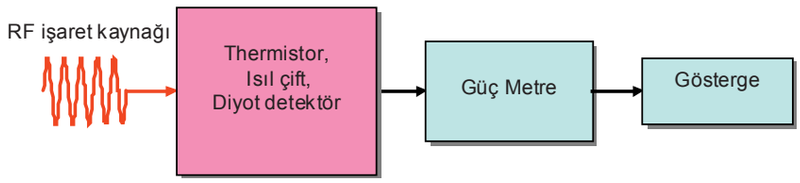
Gerilim transformatörleri kalibrasyonlarında yaygın olarak kullanılan bu yöntem; kalibrasyonu yapılacak olan gerilim transformatörünün (DUT) bir standart gerilim transformatörü (SVT) ile karşılaştırılmasıdır. Bir elektronik gerilim karşılaştırıcı köprü (test set) yardımıyla belirlenen iki gerilim transformatörü arasındaki oran ve faz farkları, kalibrasyonu yapılan gerilim transformatörünün hatası olarak kabul edilir. Rutin kalibrasyonlarda en sık kullanılan yöntem karşılaştırma yöntemidir.



Şekil 274. Gerilim transformatörü kalibrasyonu - Karşılaştırma yöntemi

7.4.7 RF GÜÇ

Mikrodalga, güç seviyesi 10 mW'dan küçük olduğunda düşük seviyeli güç, 10 mW - 10 W arasında olduğunda orta seviyeli güç ve 10 W'dan yüksek olduğunda ise yüksek seviyeli güç olarak isimlendirilir. Mikrodalgada güç ölçümü, algılayıcı (thermistor, ısılçift, diyot dedektör) üzerinde tüm güç veya iletim hattındaki gücün belirli bir miktarının harcanması ve algılayıcı çıkışında elde edilen elektriksel işaretin ölçüm devresinde değerlendirilmesiyle gerçekleştirilir. Mikrodalga güç ölçüm sistemlerine ait blok gösterim Şekil 275'de verilmiştir [155].



Şekil 275. Mikrodalga güç ölçüm sistemi blok şeması

Mikrodalga güç ölçümlerinin doğruluğu, kullanılan ölçme tekniğine bağlıdır. Güç ölçmek için thermistor, diyot ve ısılçift olmak üzere farklı teknikler kullanılmaktadır. Thermistor tekniği, RF-DC güç transferi veya yerine koyma metodunu, diyot doğrusal olmayan elemanların kare kuramı tepkisini ve ısılçift elektriksel gücün ısı etkisinin belirlenmesi metodunu kullanır.

7.4.7.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

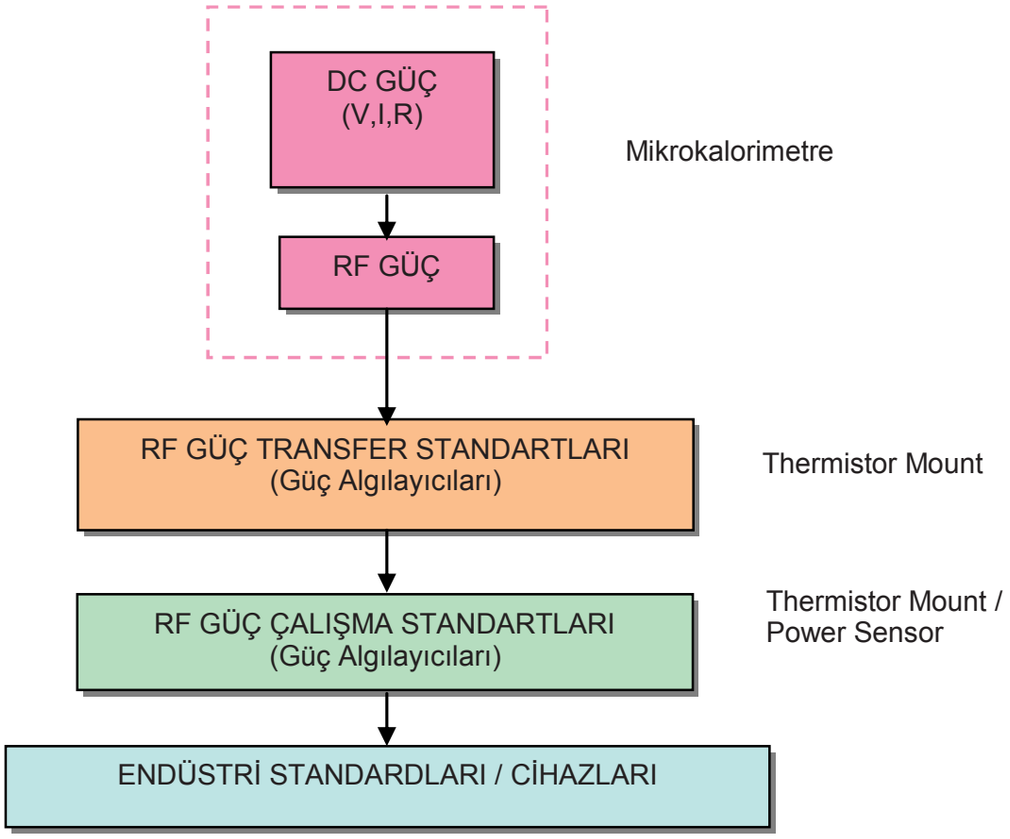
Uluslararası Birim Sisteminde güç, birim zamanda harcanan enerji olarak tanımlanmış ve birimi Watt olarak isimlendirilmiştir. Elektronik devre teorilerine göre, herhangi bir yük üzerinde harcanan güç, devreden geçen akımın ve yük üzerindeki gerilimin çarpımıdır [156].

Mikrodalga frekanslarında güç, DC güç üzerinden oluşturulur. DC gücün oluşturduğu sıcaklık değerine eşit sıcaklık oluşturan mikrodalga güç, DC güce eşit kabul edilir. Mikrodalga gücün belirlenmesinde kullanılan standartların hiyerarşik yapısı (izlenebilirlik zinciri) Şekil 276'da verilmiştir.

Ulusal metroloji enstitülerinde mikrokalorimetreler kullanılarak DC güç üzerinden mikrodalga güç ölçümü birincil seviyede yapılır [157][158]. Mikrodalga gücün doğruluğu transfer standartları ve çalışma standartları kullanılarak endüstride yapılan güç ölçümlerine aktarılır. Bu metotta ölçülen güç seviyesi her frekans için sabit bir değer olup 10 mW'tır.

Mikrokalorimetre

Mikrokalorimetre sisteminin temel elemanı, paslanmaz çelikten yapılmış bir kütle olup başlık ve gövde olarak isimlendirilen iki parçadan oluşur [159][137]. Başlık üzerine, karakterizasyonu yapılan thermistor mount, referans thermistor mount ve ince iletim hattı sabit olarak yerleştirilir. Thermistor mountlara bağlı olarak frekans alanı dolayısı ile konektör yapısı değişmektedir. Bu durumda thermistor mount'ların konektör yapısına göre farklı başlıklar kullanılabilir. Gövdenin içine ise hiçbir eleman yerleştirilmez. Bu nedenle her frekans bölgesinde kullanılabilir. Başlık ile gövde kısımları birleştirilir ve çevre şartları sağlanmış bir oda içinde bulunan su banyosunun içine yerleştirilir. Suyun ısı iletkenliğinin çok iyi olmasından dolayı çevre şartlarında oluşan değişim başlık ve gövdenin her alanında aynı anda hissedileceğinden bu değişimden kaynaklanabilecek hatalar en aza indirgenmektedir.



Şekil 276. RF güç standartlarının izlenebilirlik zinciri

Thermistor mountlar başlığa simetrik olarak yerleştirilir. Ölçüm sırasında bu thermistor mountlardan karakterizasyonu yapılanın çıkışındaki gerilim değerleri ölçülür, diğeri ise sıcaklık referansı olarak kullanıldığından çıkışında herhangi bir ölçüm yapılmaz. Sadece özel bir çoklu-ısılçift ile her iki thermistor mount'un arasındaki sıcaklık farkı nanovolt seviyesinde ölçülür. Her iki thermistor mount'un çıkışındaki bağlantı kabloları su banyosunun dışında olduğundan birinci aşamada karakterize edilen thermistor mount ikinci aşamada referans olarak kullanılabilir ve böylece thermistor mountlar su banyosunun içinden çıkarılmadan arka arkaya karakterize edilebilir.

Mikrokalorimetre sisteminin bağlantı şeması Şekil 277'de verilmiştir. Karakterize edilen thermistor mounta ait çıkışlar, bir Wheatstone köprüsüne bağlanır. RF işareti uygulanmadan önce ve sonra köprüyü dengede tutan DC güç kaynağının çıkışındaki gerilim bir multimetre ile ölçülür. Referans olarak kullanılan thermistor mounta ait çıkışlar ise ölçüm alınmadığından dolayı bağlanmayabilir. Isılçift çıkışı ise bir nanovoltmetre ile ölçülür.

Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak karakterize edilen güç algılayıcısına ait düzeltme katsayısı (etkin verimlilik, η) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_1}{P_1 - P'} \times \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_1}} \qquad (111)$$

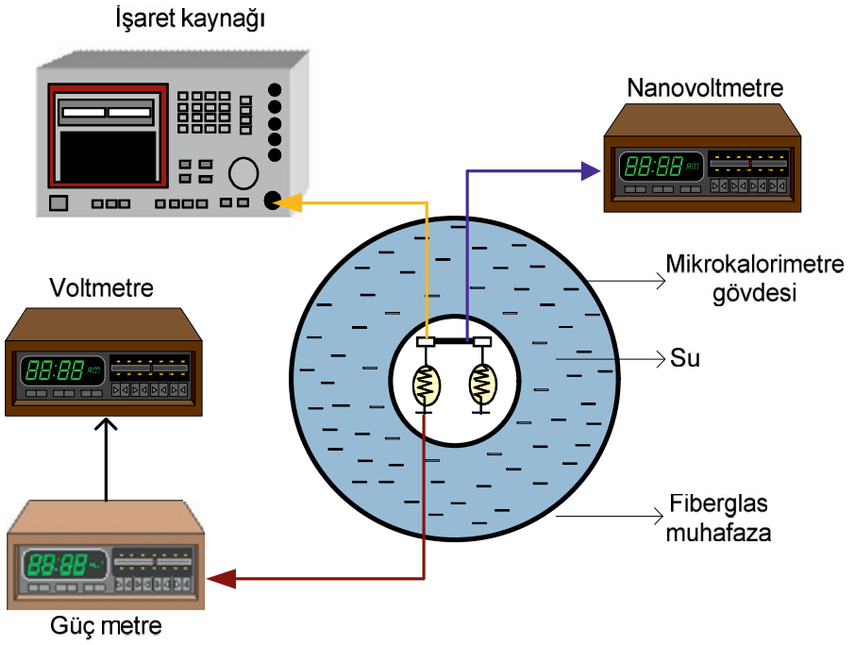
$$P_1 = \frac{V_1^2}{R} \tag{112}$$

$$P' = \frac{V_2^2}{R} \tag{113}$$

$V_{1,2}$: Thermistor mount çıkışında ölçülen köprü gerilim değerleri [V]

R : Thermistor mount direnç değeri [Ω]

$\Delta\theta_{1,2}$: Isılçift çıkışındaki gerilim değerleri [V]



Şekil 277. Mikrokalorimetre sistemi

7.4.7.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Mikrodalga güç ölçümlerinin yapılabilmesi için çeşitli algılayıcılar kullanılır. Bu algılayıcıların önemli özellikleri; duyarlılık (sensitivity) , gürültü seviyesi (noise figure) ve tepki süresidir. Bir algılayıcının duyarlılığı, özellikle düşük seviyeli ölçümlerde önemlidir ve bu duyarlılık, algılayıcının hissedebildiği en küçük işaret seviyesi olarak ifade edilir. Ancak algılayıcının içerisinde bir gürültü varsa, gürültü seviyesinin altında kalan işaretler ölçülemez. Bu nedenle, iyi bir algılayıcı düşük gürültü seviyesine sahip olmalıdır.

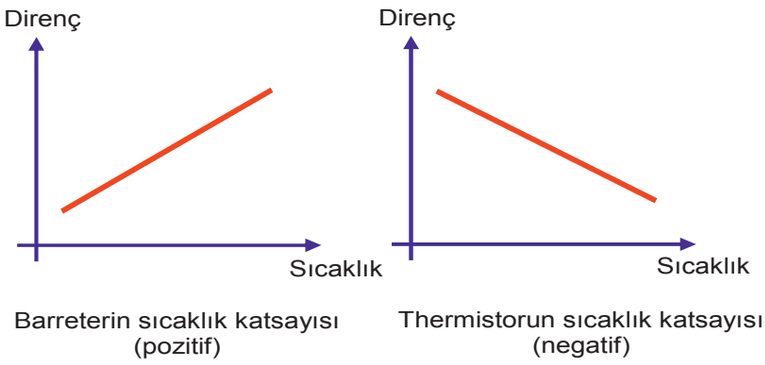
Farklı algılayıcılar mikrodalga işareti uygulandığında farklı tepki gösterirler. Uygulamada kullanılan algılayıcıların tepkisi, doğrusal veya kare kuramı (quadratic, square-law) olmak üzere iki tiptedir. Doğrusal tepkiye sahip bir algılayıcının çıkışındaki işaret, girişindeki güç ile doğru olarak bağıntılıdır. Kare kuramı tepkiye sahip bir algılayıcının çıkışı ise girişinin karesidir. Bazı algılayıcılar hem doğrusal hem de kare kuramı tepkiye sahiptir. Doğrusal bölüm yüksek, kare kuramı bölümü ise düşük seviyedeki güçlerin ölçümünde kullanılır [160].

Bolometre Tipi Algılayıcı

Bolometre, değeri sıcaklık ile değişen bir çeşit dirençtir. Uygulanan mikrodalga gücün ısı etkisi nedeniyle değeri değişir. Duyarlılığı tipik olarak (5 - 50) Ω/mW aralığındadır. Bolometrelerin, barretter ve thermistor olmak üzere iki tipi vardır (Şekil 278).

Barretter, platinyumdan yapılmış çok ince bir tel dirençtir ve pozitif sıcaklık katsayısına sahiptir. Uygulanan en yüksek değerdeki mikrodalga güç, barretterin yanma (kopma) değerini aşmamalıdır. Barretterler en basit ve en hassas algılayıcılardır. Ancak yansıma kayıplarına neden oldukları için mikrodalga güç ölçümü için uygun değildirler.

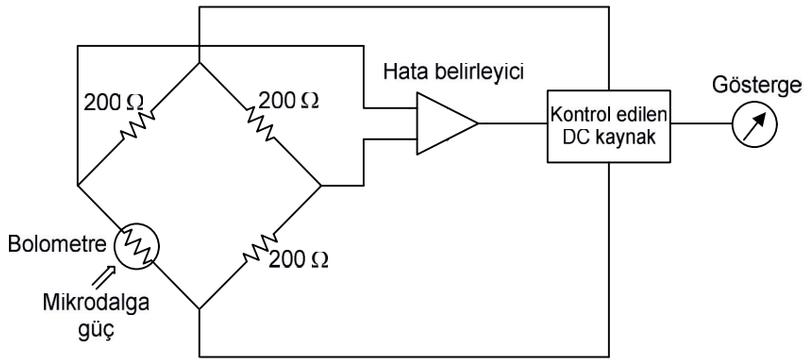
Thermistor, yarıiletken bir elemandır ve negatif sıcaklık katsayısına sahip bir direnç özelliği gösterir. Birbirine çok yakın, paralel iki tel arasındaki boşluğa yerleştirilen bu elemanlar hem koaksiyel hem de dalga kılavuzu yapısında kurulan sistemlerde kullanılabilir. Bolometre tipi algılayıcılar çoğunlukla +10 dBm ile -20 dBm aralığındaki güç ölçümlerinde kullanılırlar.



Şekil 278. Barreter ve thermistorun sıcaklık katsayıları

Bolometre ile Güç Ölçüm Sistemi

Bu ölçüm sisteminde bir Wheatstone köprüsü kullanılır. Şekil 279'da verildiği gibi köprünün bir koluna bolometre bağlanır. Bolometreye mikrodalga güç uygulanmadan önce köprü DC veya düşük frekanslı (AF) bir işaret ile dengeye getirilir. Daha sonra mikrodalga güç uygulanır. Mikrodalga güç bolometre üzerinde ısı oluşturur. Oluşan sıcaklık nedeniyle bolometrenin direnci değişir ve bu direnç değişimi de köprünün dengesinin bozulmasına neden olur. Köprünün tekrar dengeye getirilebilmesi için daha önce belirli bir değere ayarlanan DC veya AF gücü azaltılır veya arttırılır. DC veya AF güçteki değişim bolometreye uygulanan mikrodalga güce eşittir. Fark gücü göstergeden mikrodalga güç olarak okunur.

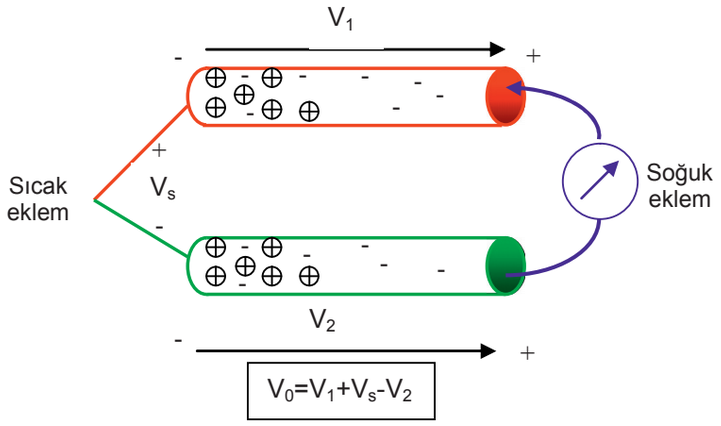


Şekil 279. Otomatik köprü ile güç ölçüm sistemi

Köprünün otomatik olarak dengelenmesi nedeniyle bolometre direncinin devamlı sabit kalması sağlanır. Yani bolometreye bütün güç kaynaklarınca uygulanan toplam güç sabit kalır. Örneğin mikrodalga güç uygulanmadığında köprü 10 mW DC güç ile dengedeyken, bolometreye 4 mW mikrodalga güç uygulanırsa bolometre üzerindeki toplam güç 6 mW DC güç ve 4 mW mikrodalga güç olur.

Isılçift Tipi Algılayıcı

Isılçiftler, iki farklı metalin bir noktada birleştirilmesi ile oluşturulurlar. Isılçiftin birleşim noktaları sıcak nokta, metallerin diğer uçları ise soğuk nokta olarak isimlendirilir ve soğuk uçlar bir ölçüm sistemine bağlanır (Şekil 280). Metallerin sıcak ve soğuk uçları arasında ısı farkı oluştuğunda, bir elektromotor kuvvet üretilir. Soğuk noktaların karşısına bir yük bağlandığında, iki nokta arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olarak üretilen elektromotor kuvvetin değeri gerilim olarak okunur. Bu ısıl elektromotor kuvvetin büyüklüğü, sıcaklık farkına ve metallerin özelliklerine bağlıdır.

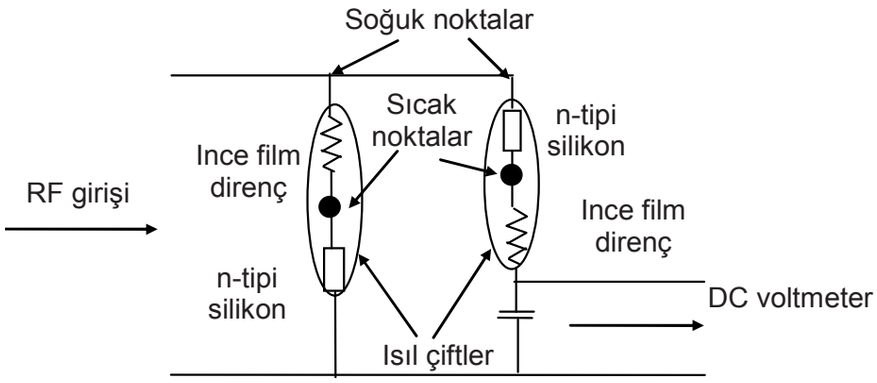


Şekil 280. Isılçift prensip şeması

Sıcak nokta, ince film dirençle yarı iletkenin bağlandığı noktadır. İnce film direnç mikrodalga gücü ısıya çevirir ve soğuk noktalara göre sıcak noktanın daha sıcak olmasına neden olur. Isılçift algılayıcılar, termistorlere göre daha büyük dinamik ölçüm alanına sahip olup -30 dBm'e kadar ölçüm yapabilirler.

Isılçift ile Güç Ölçüm Sistemi

Güç ölçüm devresine bir mikrodalga gücü uygulandığında, ısılçift bir ısıl gerilim üretir. Girişe uygulanan mikrodalga güç ile orantılı olan bu gerilim değeri milivoltmetre üzerinden Watt olarak okunur. Bu sistemin birçok dezavantajları vardır. Bunlardan biri, ısılçift çapının büyüklüğüdür. Isılçiftin çapı, deri etkisini azaltmak amacıyla küçük olmalıdır. Ancak çap çok küçük olduğunda ısılçift yüksek akım nedeniyle kopabilir. İnce film teknikleri kullanılarak söz konusu dezavantajlar aşılmıştır. Bir silikon çipin üzerine yerleştirilen ince film mikrodalga gücünü ısıya çevirir ve çipin merkezinin dış uçlardan daha sıcak olmasına neden olur. Uygulamada kullanılan ve Şekil 281'de şeması verilen ısılçift devresinde iki adet ısılçift kullanılmıştır [161]. Her birinin direnci 100 Ω olup DC gerilim için seri, mikrodalga için paralel bağlıdırlar. Dolayısıyla mikrodalga iletim hattına karşılık gösterdiği direnç değeri 50 Ω'dur.



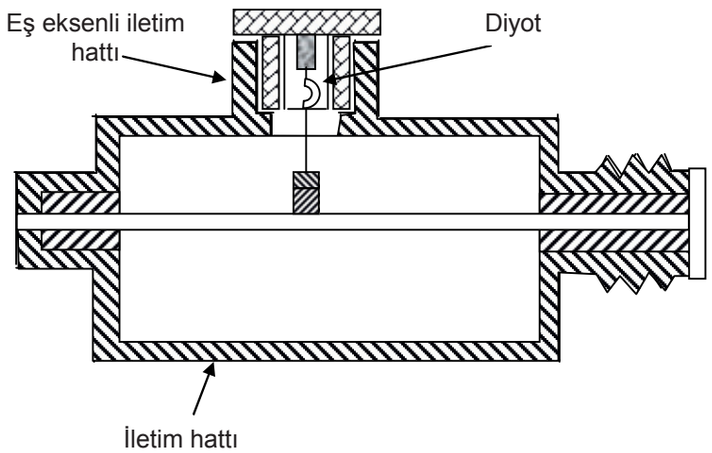
Şekil 281. Isılçift güç ölçüm devresi

Bu algılayıcıların çıkışı bolometre devresindeki gibi geri besleme ile kontrol edilemez. Bu nedenle algılayıcılar çoğunlukla, 1 mW, 50 MHz değerindeki referans güç ile kontrol edilmelidir.

Diyot Tipi Algılayıcı

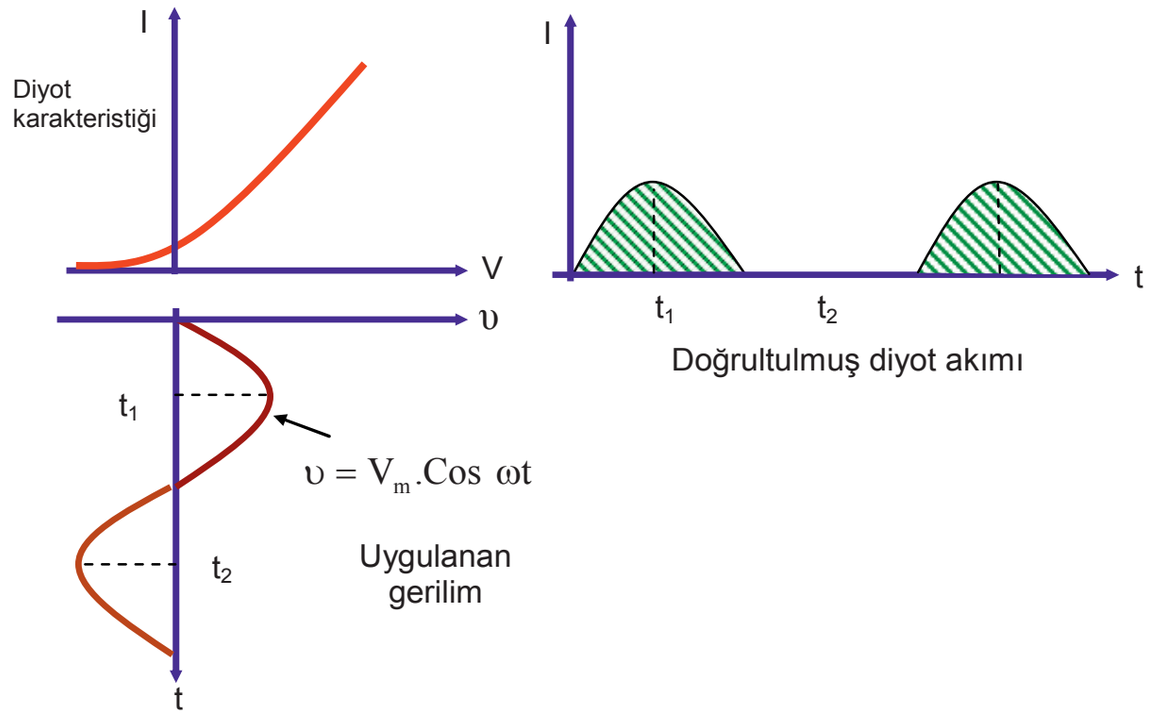
Diyot algılayıcılar, -70 dBm (100 pW) gibi düşük seviyelere kadar olan güç ölçümlerinde kullanılır. Yüksek frekanslardaki bir mikrodalga işareti, doğrultularak DC işarete çevrilir ve DC güç ölçülür. Diyot algılayıcıların en büyük avantajı, mikrodalga gücünü DC güce çevirme işlemindeki verimliliğidir. Diyot algılayıcının kare kuramı (square-law) karakteristiği kullanıldığında düşük seviyelerdeki mikrodalga güç başarıyla DC güce çevrilir. Diyotlar üretim tiplerine göre nokta temas, Schottky Barrier ve back diyot olarak isimlendirilirler.

Bir diyot ile sonlandırılmış ve güç ölçümünde kullanılan eş eksenli bir iletim hattı Şekil 282'de gösterilmiştir.



Şekil 282. Eş eksenli iletim hattına yerleştirilmiş diyot şeması

Diyot Kare Kuramı:



Şekil 283. Diyot karakteristiği

$$I = I_0 \times \left(e^{\frac{\upsilon}{V_0}} - 1 \right) = I_0 \times \left[\frac{V_m}{V_0} \times \mathrm{Cos}\,\omega t + \frac{1}{2} \times \left(\frac{V_m}{V_0} \right)^2 \times \mathrm{Cos}^2\,\omega t + ... \right] \qquad (114)$$

I : Diyot akımı [A]

I_0 : Sızıntı akımı [A]

V_0 : Sabit $V_0 = \frac{k \times T}{e}$

k : Boltzman sabiti [1,38×10^{-23} J/K]

T : Sıcaklık [K]

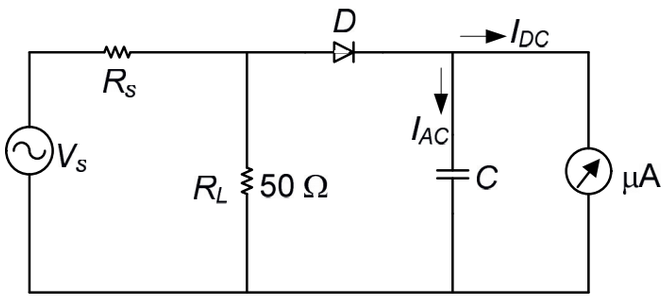
e : Elektron yükü [-1,602×10^{-19} C]

Eşitlik (114)'den yola çıkıldığında, Eşitlik (115)'de verildiği gibi uygulanan gerilimin karesi ile güç ve DC akım ile gerilimin karesinin doğru orantılı olduğu görülür. Böylece Diyottan akan DC akım ile gücün doğru orantılı olması nedeni ile, akımın ölçülmesi ile dolaylı olarak güç ölçülmüş olur.

$$\left.\begin{array}{l} P_m \;\alpha\; V_m^{\,2} \\ I_{DC} \;\alpha\; V_m^{\,2} \end{array}\right\} \Rightarrow P_m \;\alpha\; I_{DC} \qquad (115)$$

Diyot ile Güç Ölçüm Sistemi

Bu ölçüm sisteminde mikrodalga güç, yarı iletken bir diyot ile DC güce çevrilir ve bu değer mikro ampermetre ile okunur. Şekil 284'de verilen diyot güç ölçüm devresinin girişine uygulanan mikrodalga güç, yük direnci R_L (50 Ω) üzerinde harcanır. Bu durumda oluşan gerilim diyot tarafından doğrultur ve AC bileşeni kapasitör üzerinden toprağa verilir, DC bileşeni ise ampermetre üzerinden Watt olarak okunur.



Şekil 284. Diyot ile güç ölçüm devresi

7.4.8 ELEKTRİK YÜKÜ

7.4.8.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

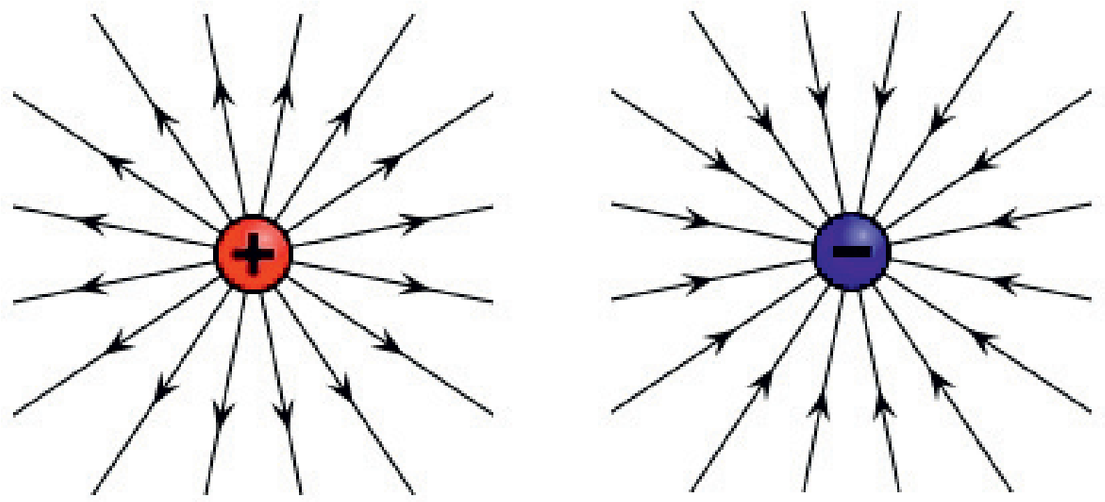
Elektrik yükü, maddenin fiziksel bir özelliğidir ve yüklü başka bir madde ile arasında elektromanyetik etkileşimi meydana getirerek birbirlerine kuvvet uygulamalarını sağlar. Pozitif ve negatif olarak iki ayrı türde olabilir. Aynı türde yükler birbirine itme kuvveti uygular iken, farklı türde yükler birbirine çekme kuvveti uygulamaktadır. Elektrik yükü türetilmiş bir SI birimi olup, *Q* sembolü ile gösterilir. Birimi, Fransız fizikçi Charles-Augustin de Coulomb'un ortaya koyduğu yüklü cisimler arasındaki kuvvet etkileşimi üzerine yasa (Coulomb kanunu) dolayısı ile Coulomb (C)'dur. Özellikle elektrik mühendisliğinde kullanılan bir diğer gösterimi de amper-saat (A h)'dir.

Yukarıda da belirtildiği gibi elektrik yükü maddenin doğasından gelen bir özelliktir. Örneğin bir elektronun (negatif) ya da protonun (pozitif) doğal olarak sahip olduğu elektriksel yük yaklaşık olarak $1{,}602\times10^{-19}$ C'dur. Başka bir deyişle $6{,}242\times10^{18}$ adet elektron -1 C yük oluşturur [162].

Bilindiği gibi elektrik akımı, birim zamanda geçen elektrik yükü miktarı olarak tanımlanır. Temel SI birimlerinden olan elektrik akımı ve zaman kullanılarak elektrik yükü tanımı türetilmektedir.

$$Q=I \times t \qquad (116)$$

Eşitlik (116)'da Q (coulomb) elektrik yükünü, I (amper) elektrik akımını, t (saniye) zamanı göstermektedir.



Şekil 285. Pozitif - negatif elektrik yükleri ve oluşturdukları elektrik alan

Başka bir ifade ile üzerinden bir amper sabit akım akmakta olan iletkenin tam kesitinden bir saniyede geçen elektrik yükü miktarı bir coulomb olmaktadır. Elektrik yükü aynı zamanda kapasitans ve gerilime bağlı olarak da ifade edilebilir.

$$Q = C \times V \qquad (117)$$

Eşitlik (117)'ye göre bir voltluk potansiyel fark ile şarj edilen bir farad'lık kapasitenin toplam yükü bir Coulomb olmaktadır [163].

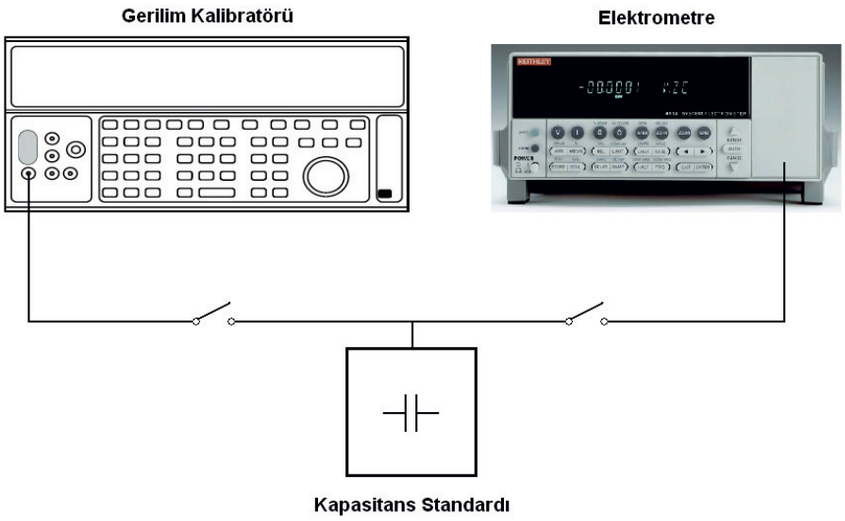
7.4.8.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Elektrik yükü ölçümlerinde elektrometre cihazları kullanılır. Elektrometreler aynı zamanda potansiyel fark (gerilim) ölçümlerinde de kullanılabilmektedir. Nanovoltmetrelerin yaklaşık 10^{10} Ω değerinde olan giriş empedansına karşılık elektrometreler 10^{14} Ω seviyelerinde giriş empedansına ve 1 fA (femtoamper) seviyelerinde sızıntı akımına sahiptir. Böylece fC (femtocoulomb) seviyesinde elektriksel yük ölçümlerini gerçekleştirebilir. Şekil 286'da Keithley 6514 Elektrometre cihazı görülür. 2×10^{14} Ω giriş empedansına sahip bu cihaz 20 nC, 200 nC, 2 µC, 20 µC ölçüm kademelerine ve sırası ile 10 fC, 100 fC, 1 pC, 10 pC ölçüm çözünürlüğüne sahiptir [164].



Şekil 286. Elektrometre (Üretici: Keithley, Model: 6514)

Elektrometrenin kalibrasyonu, kapasitans ve gerilim standartları kullanılarak gerçekleştirilir. Örneğin 20 nC seviyesini kalibre etmek için 20 nC elektriksel yük elde edilmesi gereklidir. Bunun için bir gerilim kalibratöründen 20,00000 V gerilim değeri 1 Nf değerinde kapasitans standardına uygulanır. Sonuçta kapasitans standardı C × V kadar bir elektrik yükü ile dolacaktır. Nominal değerlere göre 20 nC olacak bu yükün gerçek değeri, kalibratörün ve kapasitörün kalibrasyon verileri kullanılarak hesaplanır. Kapasitans standardı elektrometreye bağlanarak 20 nC yük cihaza uygulanır ve değer ekrandan okunur (Şekil 287).



Şekil 287. Gerilim kalibratörü ve kapasitans standardı ile referans elektrik yükü elde edilmesi

7.4.9 MANYETİK ALAN VE MANYETİK AKI YOĞUNLUĞU

7.4.9.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Manyetik metroloji, vakumda ve malzeme içerinde manyetik alan ölçümleri olmak üzere iki grubu ayrılabilir. Temel olarak manyetik alan ölçülmesine rağmen, her iki durum için ölçüm teknikleri farklıdır. Hareket eden yüklü parçacıklar çevresinde manyetik alan oluşturur. Dolayısıyla, çevremizde elektrik tellerinden geçen akımın oluşturduğu manyetik alanlar bulunmaktadır. Manyetik alan oluşturmak için genellikle silindir şeklinde uzun bir bobinin üzerine tel sarılır ve silindirin merkezinde alan oluşturulur. Bu aynı zamanda metrolojide kullanılan çalışma standardı yapmanın en genel yöntemidir. Malzeme içersindeki manyetik alan ise en basit anlamda atomların çekirdeği ve çekirdek etrafında dönen elektronların oluşturduğu mikroskobik akımlardan kaynaklanmaktadır.

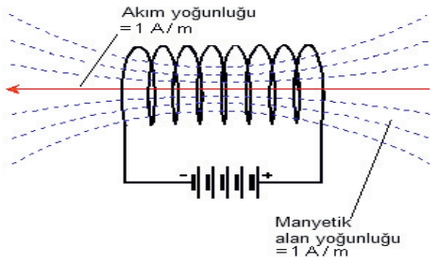
Manyetik alan teriminin sürekli mıknatıs, bobin ya da tek bir telin oluşturduğu tüm alanlar için kullanılması uygundur. Manyetik alan ölçümlerinden bahsederken manyetik akı yoğunluğu ifadesi de kullanılır. Farklı şekillerde adlandırılmalarına rağmen aslında hepsi aynı büyüklüğün ölçümünü kastetmektedir.

Manyetik Birimlerin Tarihçesi

Manyetik alan birimleri Uluslararası Birimler Sistemine (SI) 1960 yılında girdi. O zamana kadar, manyetik alan ve maddelerin manyetik özellikleri 1832 yılında Alman matematikçi Carl Friedrich Gauss tarafından geliştirilen CGS Gauss sistemi ile ifade ediliyordu. CGS sistemine manyetik birimlerin dahil edilmesi İngiliz Fizikçi James Clerk Maxwell ve W. Thomson tarafından elektromanyetik alan eşitliklerinin bulunmasıyla gerçekleşti. 1960 yılından sonar SI birim sistemi çok yaygın olarak kullanılmaya başlanmasına rağmen manyetizma ve elektromanyetizma konusunda CGS birimleri hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi CGS sisteminin SI sistemine göre pratik uygulamalar açısından daha uygun olmasıdır. Örneğin, boşlukta ve madde içerisinde manyetik alan SI sisteminde birbirinden tamamen farklı büyüklüklermiş gibi tanımlanır. Oysa CGS sisteminde farklı isimler ile ifade edilmelerine rağmen her ikisi birbirine eşittir. Bununla birlikte, CGS sisteminde manyetik alan birimi olarak kullanılan Gauss (G) pratik kullanım açısından SI birimindeki karşılığı olan Tesla'ya (T) göre daha uygundur. Çünkü Tesla çok büyük manyetik alanı ifade eder. Dünyanın manyetik alanının yaklaşık 0,5 G olduğu düşünülürse bu büyüklük SI sisteminde 5×10^{-5} T'ya karşılık gelmektedir. Bu dokümanda her iki sistemde de (SI ve CGS) manyetik alan birimleri tanımlanacak ve aralarındaki bağıntılar verilecektir.

Manyetik Birimlerin Tanımı

Manyetik Alan Şiddeti, H: SI birim sisteminde, manyetik alan Amper/metre (A/m) olarak tanımlanır. Bu tanımdan da anlaşılacağı gibi manyetik alanı elektrik akımı oluşturur ve alan şiddeti uzaklık ile ters orantılıdır. Akımın geçtiği telden uzaklaştıkça azalır. Tanım olarak 1 A/m, 1 sarımlık bir bobinden 1 amper akım ya da 1000 sarımlık bir bobinden 1 mA akım geçtiğinde merkezinde oluşan manyetik alan değeridir. Bobin içerisinde oluşan manyetik alan çizgileri Şekil 288'de gösterilmiştir.



Şekil 288. Bobin ile oluşturulan manyetik alan çizgileri

Manyetik alan tanımını düzgün bir tel üzerinde yapmak daha açıklayıcı olabilir. Şekil 288'deki gibi bir tel üzerinden akım geçtiğinde telin çevresinde $\mathbf{H}=\frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi R}$ kadar manyetik alan oluşur. Burada I tel üzerinden geçen akımı (birimi amper), R iletkenden olan uzaklığı (birimi metre) ve μ_0 ortamın manyetik geçirgenliğini ifade eder. Telden geçen akım 1 A ise 1 m uzaklıkta yaklaşık olarak 0,16 A/m kadar manyetik alan oluşur.

Manyetik Akı Yoğunluğu (Manyetik İndüksiyon), B: SI birim sisteminde manyetik akı yoğunluğu Tesla (T) ile ifade edilir. 1960 yılında fizikçi ve elektrik mühendisi olan Nikola Tesla onuruna bu isim verilmiştir. 1 Tesla bir weber/metrekare'ye eşittir. Bir başka deyişle 1 metrekare alanında 1 weber kadar akı oluşturan manyetik alan şiddetine eşittir. Manyetik akı yoğunluğu genellikle B ile gösterilirken boşlukta ise H ile gösterilir. Boşlukta, B ve H arasında aşağıdaki gibi bir eşitlik vardır [165].

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \tag{118}$$

Burada $\boldsymbol{\mu}_0$ boşluğun manyetik geçirgenliğini ($4\pi\times10^{-7} \approx 1{,}257\times10^{-6}$ H m^{-1}) ifade eder. H (Henry) ise indüksiyon birimidir.

Malzeme içerisinde ise;

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \tag{119}$$

μ geçirgenliği ve μ_r ise maddenin göreceli manyetik geçirgenliğine karşılık gelir. Yukarıdaki eşitliklere baktığımızda B ve H aynı büyüklüğü ifade etmesine rağmen (boşlukta ve malzeme içerisindeki manyetik alan) SI sisteminde farklı birimlere sahip olduğunu görürüz. Manyetik geçirgenlik malzemenin ne kadar kolay mıknatıslanacağını gösteren bir parametredir. Manyetik olmayan malzemelerin μ_r değeri 1'e yakındır dolayısıyla B değeri μ_0H kadardır. Dolayısıyla, manyetik alanın boşluktaki değeri ile malzeme içindeki değeri aynıdır. Manyetik malzemelerde ise μ_r değeri birkaç yüz hatta birkaç bin olabilir.

Yukarıdaki tanıma göre (1 weber/ metrekare), Tesla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$1\,\mathrm{T} = 1\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2} = 1\frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{m}^2} = 1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A\,m}} = 1\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{C\,s}} = 1\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{A\,s}^2} \tag{120}$$

Burada A amperi, C coulomb, kg kilogramı, m metreyi, N newtonu, s saniyeyi, V voltu ve Wb weber'i ifade eder. Manyetik alan birimi H ise tanımından da anlaşıldığı gibi A/m'dir.

Manyetik Akı, Φ: Yüzeyden geçen manyetik akı B manyetik alanının o yüzeydeki bileşeni olarak tanımlanır. Homojen bir B alanı için, manyetik akı alan ile yüzey alanının çarpımına eşittir.

$$\Phi = \mathbf{B}\cdot\mathbf{S} = B\,S\cos\varphi \tag{121}$$

Burada B, manyetik alanın büyüklüğünü, S yüzey alanını ve φ ise her ikisi arasındaki açıya karşılık gelir. Kalın **B** ve **S** harfleri bu büyüklüklerin vektörel oluğunu ifade eder (S vektörü yüzeye diktir ve büyüklüğü yüzey alanına eşittir).

Homojen olmayan alanlar ve düzgün olmayan yüzeyler için Eşitlik (121)'in en genel şekli aşağıdaki gibidir.

$$\Phi = \int \mathbf{B}\cdot d\mathbf{S} \tag{122}$$

Görüldüğü gibi manyetik akı manyetik indüksiyondan (B) elde edilir. Fakat SI birim sisteminde manyetik indüksiyon B, manyetik akı ile tanımlanır ve genellikle manyetik akı yoğunluğu ile

adlandırılır. Dolayısıyla, manyetik akının bağımsız bir tanıma ihtiyacı vardır. SI birim sisteminde, manyetik akı birimi weber (Wb)'dir ve volt·saniye'ye eşittir.

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{V s} \tag{123}$$

Bu tanım manyetik indüksiyon yasası kullanılarak yapılmıştır. Kapalı bir devrede manyetik akı zaman içerisinde değişiyorsa, bu değişim $V_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ kadar gerilim indükler. Bir başka ifadeyle, gerilim, manyetik akı değişiminin hızına karşılık gelir. Buradan Eşitlik (123)'deki birim kendiliğinden ortaya çıkar.

Eşitlik (121)'e bakacak olursak, manyetik indüksiyon birimi Tesla ve yüzey alanı da metrekare olduğundan manyetik akı birimi T m^2 olarak aşağıdaki gibi ortaya çıkar.

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{V s} = 1\ \text{T m}^2 \tag{124}$$

Manyetik akı, akımetre adı verilen cihazlar ile ölçülür. Akımetre gerçekte zamana göre integral alabilen bir voltmetredir. Dolayısıyla, akımetrenin çalışma prensibi Eşitlik (123)'e dayanır.

Manyetik Moment ve Maddenin Mıknatıslanması

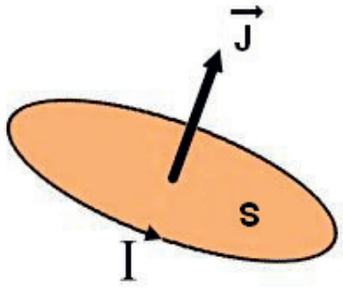
Maddelerin mıknatıslanması ile ilgili birimleri anlayabilmek için, fizikte manyetizma konusuna kısaca değinmek yerinde olacaktır. Manyetik moment bir maddenin sahip olduğu mıknatıslanma miktarını belirtir. Eğer bunu o maddenin hacmine bölersek, ölçtüğümüz maddenin içerdiği elementin ya da bileşiğin mıknatıslanmasını bulmuş oluruz. Eşitlik (119)'a baktığımızda, madde içerisindeki indüklenmenin μ_0 H kadar olmadığını görürüz. Bunun sebebi maddenin mıknatıslanmasıdır. Dolayısıyla, mıknatıslanma madde içindeki manyetik alanın etkisini ifade ederken, manyetik indiksiyon (B) toplam manyetik alanı bir başka deyişle boşluktaki manyetik alan ve madde içerisindeki alanın toplamını anlatan bir ifadedir. Manyetik indüklenme Eşitlik (125)'teki gibi yazılabilir [166].

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}), \tag{125}$$

Burada H dış manyetik alanı (boşluktaki alan) ve M maddenin mıknatıslanmasına karşılık gelir. Mıknatıslanma, Eşitlik (126) ile ifade edilir.

$$\mathbf{M} = \mathbf{J} / \text{V}, \tag{126}$$

Eşitlikteki J manyetik momenti, V ise test edilen malzemenin hacmidir. Manyetik moment kapalı bir halka üzerinden akım geçmesi sonucu oluşmakta ve halkanın kesit alanı ile elektrik akımının çarpımına eşittir.



Şekil 289. Manyetik moment

$$J = \mathbf{I} \cdot \mathbf{S} \quad (127)$$

Bu eşitlikte I elektrik akımına, S ise halkanın kesit alanına karşılık gelmektedir. Elektrik akımı amper (A), kesit alanı da m^2 alındığında manyetik moment birimi *emu* ile ifade edilir. Manyetik moment halkanın kesit alanına dik yönde olan vektörel bir büyüklüktür. Çekirdek etrafındaki elektronların dairesel hareketlerinden kaynaklanan elektriksel akım göz önüne alındığında yukarıda yapılan manyetik moment tanımı madde için de geçerlidir. Yani her atom minik manyetik momentlere sahiptir. Bir araya geldiklerinde maddenin toplam manyetik momentini oluştururlar. Yukarıda yapılan mıknatıslanma tanımından yola çıkarak birim hacim başına manyetik moment belirlendiğinde ise maddenin toplam mıknatıslanmasına ulaşılır.

Manyetik moment formülü dikkate alındığında manyetik moment birimi A m^2 (emu) olmakta ve SI birim sisteminde herhangi bir özel ismi bulunmamaktadır. Eşitlik (125)'e göre ise mıknatıslanmanın manyetik alan ile aynı birimde, yani A/m olması gerekir. Fakat pratik uygulamalarda mıknatıslanma genellikle $\mu_0 M$ ile gösterilir ve manyetik indüksiyon ile aynı birim kullanılmaktadır (Tesla, T).

Manyetik Geçirgenlik ve Alınganlık

Manyetik malzemelerde, malzeme içindeki manyetik alan malzeme dışındaki (uygulanan) manyetik alandan farklıdır. Bu fark malzemenin mıknatıslanması, M'den dolayı oluşmaktadır. Çok büyük dış manyetik alan ve çok düşük sıcaklık haricinde diyamanyetik ve paramanyetik malzemeler için manyetik alan ve mıknatıslanma arasında doğrusal bağlantı bulunmaktadır [166].

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (128)$$

Bir malzemenin dışarıdan uygulanan bir manyetik alan ile mıknatıslanma kapasitesini belirlemek için manyetik alınganlık χ tanımlanmıştır. Manyetik alınganlık χ uygulanan bir manyetik alan H ile mıknatıslanmasındaki değişim hakkında bilgi verirken, manyetik geçirgenlik μ yine manyetik alan H ile malzemenin içinde oluşan toplam alan B hakkında bilgi vermektedir

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (129)$$

Eşitlik (125), (128) ve (129) kullanarak manyetik geçirgenlik ve alınganlık arasındaki bağlantı elde edebilir:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (130)$$

Manyetik alınganlık χ ise birimsiz bir büyüklüktür. Genellikle geçirgenlik için birimsiz bir nicelik olan göreceli geçirgenlik kavramı $\mu_r = \mu/\mu_0$ kullanılmaktadır.

Ferromanyetik özellik taşıyan malzemeler genellikte dış manyetik alana karşı doğrusal olmayan bir davranış gösterirler. Manyetik alınganlık uygulanan alana bağımlı olarak değişim gösterir. Bu durumlarda diferansiyel alınganlık

$$\chi = d\mathbf{M}/d\mathbf{H} \quad (131)$$

kullanılmaktadır. Diferansiyel geçirgenliği (130) ve (131) denklemleri kullanarak elde edilir.

Manyetik malzemelerin özelliklerini ayırt etmek için pratik uygulama alanlarında rastlanılan en önemli parametreleri ilk alınganlık ve ilk geçirgenlik değerleri olarak adlandırılan sıfır manyetik alan civarındaki alınganlık ve geçirgenlik değerleridir.

Gauss Sistemi (CGS)

Eşitlik (118) ve (119)'da görüldüğü üzere manyetik alan ve manyetik indüksiyon birimleri SI sisteminde farklık gösterir. Diğer taraftan CGS sisteminde bu birimler aynıdır. Bu nedenle CGS sistemi manyetizma alanında en çok kullanılan ve tercih edilen birim sistemi olmaktadır. Günümüzde üretilen birçok manyetik alan ölçen cihaz için gaussmetre adı verilmekte ve bir CGS birimi olan Gauss cinsinden manyetik alan büyüklüklerini ölçmektedir. Sonuç olarak manyetik alan ve manyetik akı yoğunluğu için yukarıda SI sistemi için yapılan aynı tanımların CGS sisteminde yeniden yapılması uygun görünmektedir.

Serbest uzayda manyetik geçirgenlik (μ_0) CGS sisteminde 1'e eşittir. Bu durumda Eşitlik (118) ve (119) boşluk için;

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} \qquad (132)$$

ve madde içinde

$$\mathbf{B} = \mu\,\mathbf{H} \qquad (133)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. CGS sisteminde manyetik akı yoğunluğu gauss (G) ve manyetik alan oersted (Oe) olarak ölçülür. Bu iki birimin adları farklı olmasına rağmen büyüklük olarak birbirine eşittir (1 G = 1 Oe). CGS sisteminde maddenin mıknatıslanması içinse SI sistemi için tanımlanan formüle 4π faktörü eklenir:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\,\mathbf{M} \qquad (134)$$

Manyetik moment ve mıknatıslanma arasındaki ilişki CGS ve SI sistemlerinde aynıdır,

$\mathbf{M} = \mathbf{J} / V$

Gauss sisteminde manyetik moment J elektromanyetik birimi olan "emu" ile ifade edilir. Dolayısı ile mıknatıslanma birimi emu/cm^3 olmaktadır (SI sisteminde uzunluk birimi metreyken CGS sisteminde santimetre olduğu için farklılık söz konusudur).

CGS sistemi için manyetik geçirgenlik ve alınganlık denklemleri de SI sistemi ile aynıdır:

$\chi = \mathbf{M} / \mathbf{H}$ ve $\mu = \mathbf{B} / \mathbf{H}$,

Böylece $\mu = 1 + 4\pi\chi$ eşitliği sonucu CGS sisteminde χ ve μ birimsiz parametreler olmaktadır.

CGS sisteminde manyetik akı birimi olarak Maxwell (Mx) kullanılmakta ve 1 Wb = 10^8 Mx'dir.

SI ve Gauss Sistemleri Arası Birim Dönüşümü

Gauss ve SI sistemleri arasında birim dönüşümü yapmak için aşağıdaki dönüşümler kullanılır.

Manyetik indüksiyon	: 1 T	= 10^4 G,
Manyetik alan	: 1 A/m	= (1 Oe / 1000) $4\pi \approx$ 1 Oe / 79,6
Manyetik moment	: 1 A m^2	= 10^3 emu
Manyetik akı	: 1 Wb	= 10^8 Mx

Manyetik Malzeme Çeşitleri

Doğada bulunan maddeler manyetik özelliklerine göre başlıca üç sınıfa ayrılırlar, Paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik olmak üzere [166][167]. Kısaca bu malzemeleri tanımaya çalışacağız.

Paramanyetizma ve Paramanyetik Malzemeler

Paramanyetik maddeler pozitif fakat küçük bir manyetik duygunluğa sahiptir. Genellikle son yörüngesi tamamlanmamış elementler paramanyetik özellik gösterir. Bu momentler birbirleri ile çok zayıf bir etkileşimde bulunurlar ve dış manyetik ortam olmadığı sürece gelişi güzel yönlenmişlerdir. Dolayısıyla toplam manyetik moment sıfırdır, yani dış manyetik alan olmadığı sürece mıknatıslanamazlar. Madde dış bir manyetik alana konulduğunda manyetik momentler alan yönünde yönlenmeye zorlanırlar. Ancak, bu yönelimi ortamın sıcaklığından kaynaklanan ısı enerjisi bozmaya çalışır. Paramanyetik bir maddenin mıknatıslanması dış manyetik alan şiddeti ile doğru, mutlak sıcaklık ile ters orantılıdır M=C·H/T (Curie Yasası). Eşitlik, mıknatıslanmanın artan alanla ve azalan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Çok yüksek alanlarda ve çok düşük sıcaklıklarda mıknatıslanma doyum değerine yaklaşır. Bu durumda tüm manyetik momentler manyetik alan yönünde dizilmişler demektir. Sezyum, aluminyum, magnezyum, lityum ve sodyum paramanyetik elementlere örnek verilebilir.

Diyamanyetizma ve Diyamanyetik Malzemeler

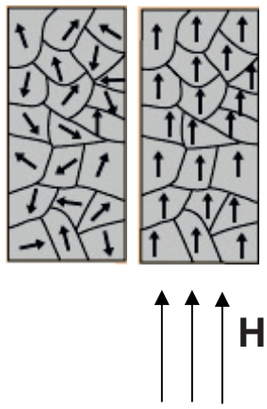
Bu etki en son elektron yörüngesi tam olarak dolu olan maddelerde görülür. Diyamanyetik bir maddeye dış bir manyetik alan uygulandığında, bu alana zıt yönde zayıf bir mıknatıslanma oluşur. Bu diyamanyetik maddelerin manyetik alan tarafından zayıfça itilmesine neden olur. Dış manyetik alan kaldırıldığında mıknatıslanmada kaybolur. Buna, çekirdek çevresindeki elektronların hareketi neden olur. Orbital elektronları, tıpkı bir iletken telden geçen elektrik akımı gibi, manyetik bir alana yol açarlar. Dışsal bir manyetik alanla karşılaşan elektronlar, Lenz Yasası uyarınca, yörüngelerini ve hızlarını değiştirerek, uygulanan alana karşı koyacak bir manyetik alan yaratırlar.

Ferromanyetizma ve Ferromanyetik Malzemeler

Atomları sürekli manyetik momente sahip az sayıda madde ferromanyetizma denilen kuvvetli manyetik etkileşim gösterir. Demir, nikel, kobalt elementleri ferromanyetik özellik göstermektedir. Bu tür maddeler zayıf bir dış manyetik alanda bile birbirine paralel olarak yönelmeye çalışan manyetik momentlerden oluşur. Momentler paralel hale geldikten sonra dış manyetik alan sıfırlansa bile mıknatıslanma kaybolmaz. Bu sürekli yönelim komşu manyetik momentler arasındaki kuvvetli etkileşimden kaynaklanır. Her bir moment komşu manyetik momenti manyetik alan doğrultusunda yönlendirmeye çalışır. Tüm ferromanyetik maddeler manyetik domain adı verilen mikroskobik bölgelerden oluşur (Şekil 290). Her bir bölgedeki momentlerin hepsi aynı yöne yönelmiştir.

Farklı yönelimlere sahip bölgeler arasındaki sınırlara bölge duvarları adı verilir. Mıknatıslanmamış numunede bölgeler net manyetik moment sıfır olacak şekilde yönelmişlerdir. Madde dış bir manyetik alana maruz kaldığında bölgeler dönerek manyetik alana yönelmeye çalışır. Başlangıçta manyetik alan yönünde olan bölgeler farklı yönde olan bölgelere göre daha fazla büyür. Dış alan ortamdan kaldırıldığında malzeme, manyetik alan yönündeki net mıknatıslanmasını korur. Oda sıcaklığında ısı enerjisinden kaynaklanan mıknatıslanmayı bozmaya yönelik etki bu yönelimi bozacak kadar etkili değildir. Ferromanyetik bir maddenin sıcaklığı Curie sıcaklığı adı verilen sıcaklığa ulaştığı ya da geçtiği zaman mıknatıslanmasını kaybeder. Isı enerjisi, manyetik momentleri bir birleriyle etkileşim kuvvetini yener ve momentlerin yönelimi kaybolur. Malzeme paramanyetik duruma geçer. Ferromanyetik malzemeleri karakterize etmek için VSM (Vibrating Sample Magnetometer-Titreşimli Örnek

Manyetometresi), SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) Manyetometre veya Permeagraph adı verilen cihazlar kullanılır. Bu cihazlardan aşağıda bahsedilecektir.



Şekil 290. Manyetik bölgelerin dış manyetik alan yokken (Sol taraftaki) ve uygulandığındaki durumları

7.4.9.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemi

Manyetik Alan ve Manyetik Moment Ölçümü

Manyetik alan şiddeti farklı çalışma prensiplerine dayanan çeşitli metotlar kullanılarak ölçülmektedir. Her metodun özel uygulamalar için gerekli kendine has özellikleri vardır. Manyetik alan ölçümlerinde kullanılan sensörlerin bazıları manyetik alan değişimine tepki göstermekte bazıları ise manyetik alan şiddetinin doğrudan büyüklüğünü ölçebilmektedir. Bu bölümde manyetik alan ölçümlerinde sıkça kullanılan bazı ölçüm metotları hakkında kısa bilgi verilmektedir.

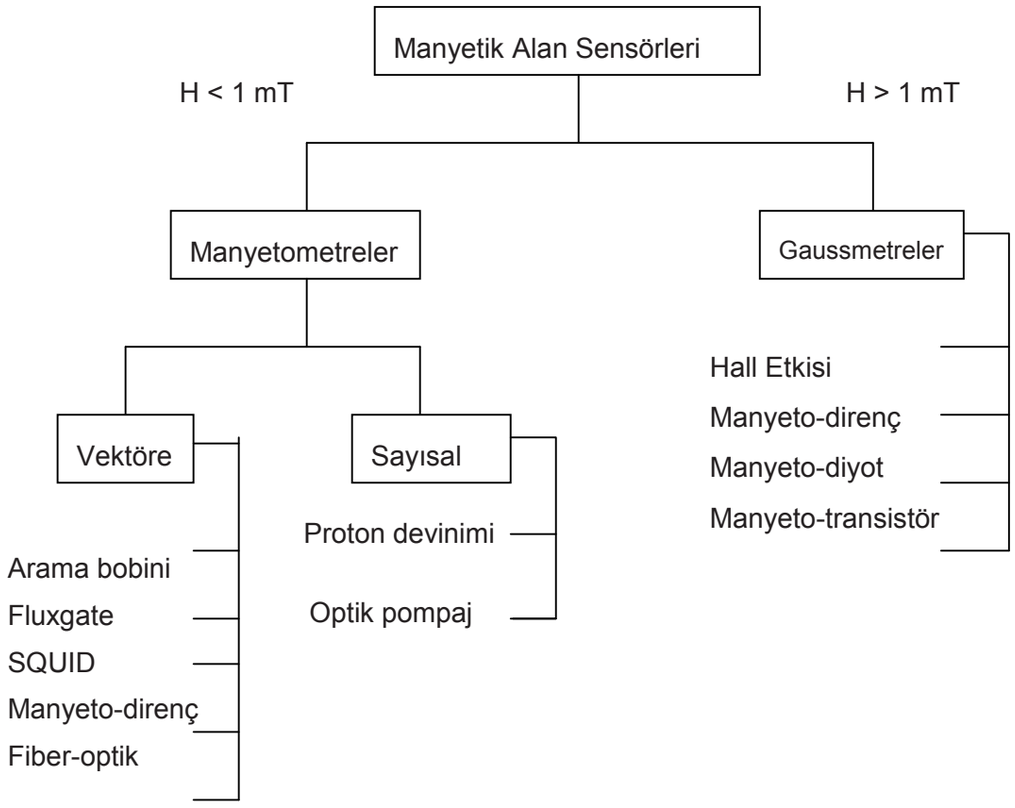
Düşük alan ölçümleri için kullanılan cihazlar genellikle manyetometre, yüksek alan ölçümleri için kullanılan cihazlar ise gaussmetre adı ile bilinir (Şekil 291).

Arama bobini [168] ve fluxgate manyetometreler [169] en yaygın kullanım alanı olan vektörel manyetik alan ölçen cihazlardır (yani manyetik alanın yönü ve büyüklüğünü ölçer). Sağlam, güvenilir ve bu alandaki diğer ölçüm cihazlarına nazaran daha düşük maliyetlidir. Fiber-optik manyetometre son zamanlarda geliştirilen düşük alan ölçüm cihazdır. Şu an için fluxgate manyetometre ile yaklaşık aynı hassasiyete sahip olmasına rağmen daha iyi performans için potansiyeli yüksektir. Süperiletken Kuantum Girişimi Cihazı (SQUID) manyetometreler bütün manyetik alan ölçümü cihazları içinde en hassas olanıdır [170]. Bu sensörler sıvı helyum sıcaklığında çalışabildiğinden özel sıcaklık kontrol sistemleri gerekir. Bu durum SQUID manyetometreleri daha pahalı, daha sağlam ve daha az güvenilir yapmaktadır.

Hall etkisi cihazı en eski ve en çok kullanımı tercih edilen yüksek alan ölçüm cihazıdır. Oldukça yüksek manyetik alanların ölçümünde (> 1 T) yerinin doldurulması oldukça güçtür. Diğer taraftan, manyeto-direnç sensörlerin ölçüm aralığı yüksek ve düşük alan ölçen sensörlerin ara bölgesini kapsamaktadır. Anisotropik manyeto-direnç sensörler birçok alanda uygulama bulmuştur. En son keşfedilen dev manyeto-direnç (GMR) etkisi hassasiyetteki on kat iyileştirme ile orta hassasiyet gerektiren uygulamalar için geleneksel manyetometrelerin yerini alabilecek gibi görünmektedir.

Proton (nükleer) devinim manyetometreleri sayısal manyetik alan şiddeti ölçümlerinde en popüler ölçüm cihazıdır. Jeolojik araştırma ve jeo-manyetik alan haritalanması en önemli uygulama alanlarındandır. Çalışma prensibi temel atomik sabitlere bağımlı olduğundan manyetometre kalibrasyonları için birincil (primer) standart olarak kullanılır. Proton devinim manyetometrelerinin çok düşük örnekleme oranı vardır (saniyede 1-3 örnek). Dolayısıyla manyetik alandaki hızlı değişimleri ölçememektedir. Optik pompaj manyetometreleri daha

yüksek örnekleme oranında çalışabildiği için proton devinim manyetometrelerinden daha hassastır. Ancak, maliyeti daha yüksek, daha az sağlam ve daha az güvenilirdir. Tablo 18'de çeşitli manyetik alan şiddeti ölçen cihazlar ve karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 291. Manyetik alan sensörleri alan şiddeti ve ölçüm bölgesine göre iki kategoriye ayrılır: düşük alan ölçümü için manyetometreler ve yüksek alan ölçümü için gaussmetreler [171]

Tablo 18. Alan şiddeti ölçer cihaz karakteristikleri [171]

Cihaz	Ölçek (mT)	Çözünürlük (nT)	Bandgenişliği (Hz)	Yorum
Arama bobini	10^{-10}- 10^{6}	Değişken	10^{-1} - 10^{6}	Durağan alanlar ölçülemez
Fluxgate	10^{-4}- 0,5	0,1	DC - 2×10^{3}	Genel amaçlı vektörel manyetometre
SQUID	10^{-9} - 0,1	10^{-4}	DC - 5	En yüksek hassasiyetli manyetometre
Hall etkisi	0,1 – 3×10^{4}	100	DC - 10^{8}	1 T üzeri en iyi
Manyeto-direnç	10^{-3} - 5	10	DC - 10^{7}	Orta alan uygulamaları için uygun
Proton devinim	0,02 – 1×10^{4}	0,05	DC - 2	Genel amaçlı sayısal manyetometre
Optik Pompaj	0,01 - 0,1	0,005	DC - 5	En yüksek hassasiyetli sayısal manyetometre

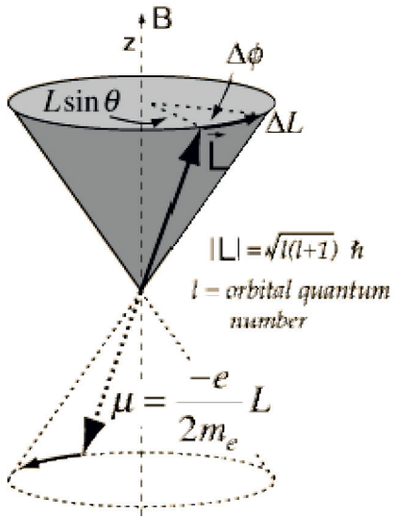
Burada endüstride sıkça kullanılan bazı manyetik alan ölçerler hakkında kısa bilgi verilmesi uygun olacaktır.

Manyetik Alan Birincil Standardı – Proton Devinim (NMR)

Proton devinim manyetometresi Şekil 292'de görüldüğü gibi atom çekirdeğindeki kendi ekseni etrafında dönme hareketi yapan protonların uygulanan manyetik alan etrafında da devinim hareketi (topaç hareketi) kazanması prensibi ile çalışır. Devinim frekansı ω_p uygulanan alan ile doğru orantılıdır. Atom çekirdeğine H_a manyetik alanı uygulanması ile çekirdek üzerinde $\mathbf{T= \mu_p \times H_a}$ gibi bir tork oluşur. Çekirdeğin açısal momentumundan dolayı bu tork çekirdeğin manyetik alan yönünün etrafında devinim hareketi yapmasına neden olmaktadır.

$\mathbf{\mu_p \times H_a = \omega_p L}$ ise $\omega_p = (\mu_p / L)\, H_a = \gamma\, H_a$

γ gyromanyetik oran olup, $(2{,}6751526 \pm 0{,}0000008)\times10^{-8}$ T^{-1} s^{-1}'dir. Yani proton devinim manyetometresi ile yapılan ölçümlerde resonans frekansı üzerinden ölçülen manyetik alan büyüklüğü belirlenmektedir.



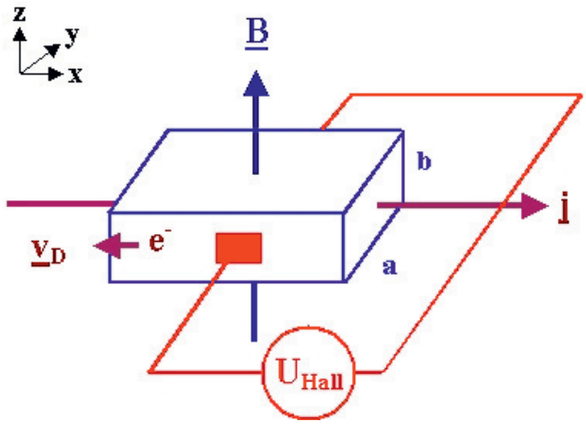
Şekil 292. Nükleer devinim. Kendi ekseni etrafında dönen bir protona H_a gibi bir manyetik alanın uygulanması durumunda yalpalama hareketi yapmaktadır (topaç hareketi).

Hall Etki Gaussmetresi

Hall etki gaussmetresinin çalışma prensibi, kuvvetli manyetik alan ölçümlerinde en çok bilinen ve yaygın kullanımı olan sensör, 1897 yılında Edwin H. Hall tarafından keşfedilen bir fiziksel olaya dayanır. Hall etkisi kısaca manyetik alanın hareketli bir q yüküne uygulanması sonucu hareket yönüne ve manyetik alan yönüne dik yönde oluşan Lorentz kuvvetinin sonucu oluşur:

$$\mathbf{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \qquad (135)$$

Hall etkisi gaussmetresi düzgün ve ince dikdörtgen bir iletken ya da yarıiletken üzerinde birbirine dik açılardaki 2 elektrot çiftinden oluşur. Şekil 293'de görüldüğü gibi bir yönde elektriksel akım (x-ekseni boyunca) uygulanır. B gibi bir manyetik alanın sensör yüzeyine dik uygulanması durumunda (z-ekseni boyunca) x-ekseni boyunca hareket eden serbest yüklerin hareket yönü y- eksenine (ya da Hall gerilim ekseni olarak da bilinir) doğru sapar (Lorentz kuvveti). Açık devre koşullarında akım y-ekseninde akamayacağı için y-ekseni boyunca yükler birikmeye başlar ve bunun neticesinde y-ekseni boyunca bir elektrik alanı oluşur:



Şekil 293. Hall etkisi.

$$E_y = v_x B_z \qquad (136)$$

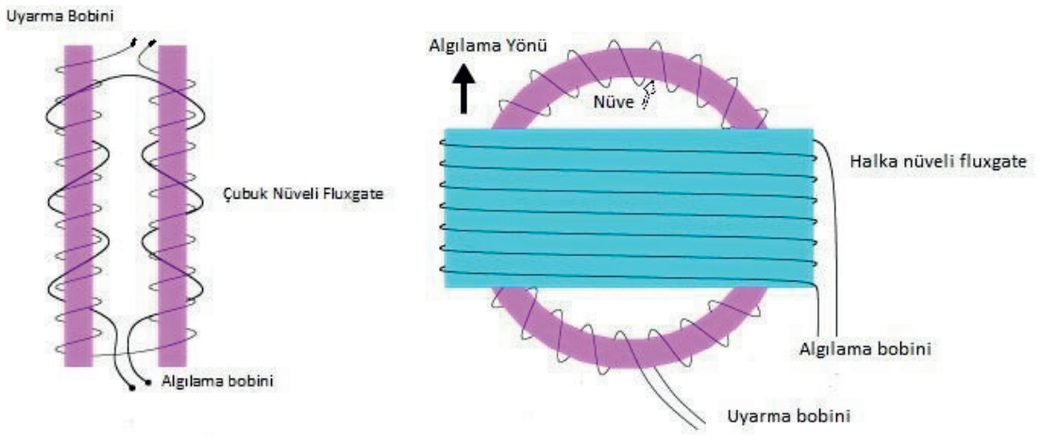
v_x elektronların ortalama sürüklenme hızıdır (ya da baskın taşıyıcıların).

Birim hacimde n tane serbest taşıyıcı olan bir iletkende akım yoğunluğu: $J_x = q\ n\ v_x$ ise oluşan elektrik alanı $E_y = \frac{J_x B_z}{qn} = R_H J_x B_z$ olarak ifade edilir. Burada R_H Hall katsayısı olarak bilinir. Hall etkisi gaussmetresi ile yapılan manyetik alan ölçümlerinde daha önce Hall katsayısı belirlenmiş bir iletkenin (ya da yarı iletkenin) x-ekseni boyunca sürülen elektrik akımı ve y-ekseninde oluşan elektrik alanı verisinden yola çıkarak ölçülmek istenilen manyetik alan büyüklüğüne ulaşılmaktadır.

Fluxgate Manyetometre

Fluxgate manyetometreler jeolojik yerkabuğu hareketlerinin incelenmesi, tahribatsız muayene, denizaltı mayınlarının algılanması ve navigasyon gibi farklı uygulama alanları için gerekli çok düşük manyetik alan büyüklüklerinin ve değişimlerinin ölçülmesinde kullanılan oldukça etkin ve tercih edilen cihazlardır [169]. Çok küçük elektriksel güç ile çalışabilmesi, fiziksel olarak küçük olabilmesi, ortam koşullarından etkilenmemesi gibi özellikler güncelliğini korumasını sağlamaktadır.

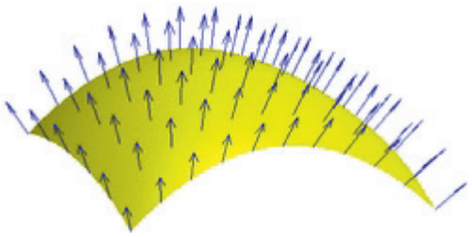
Fluxgate manyetometre tasarımı için birçok konfigürasyon mevcuttur. Ancak genelde 2 ana konfigürasyonda toplandıkları söylenebilir; çubuk nüveli ve halka nüveli (Şekil 294). Bütün fluxgate manyetometrelerde ölçülecek manyetik alanı üzerine çekebilecek kapasitede çok yüksek manyetik geçirgenliğe sahip nüveler kullanılır. Kullanılan nüve üzerine sarılan bir uyarma bobini ile yaratılan sinüs ya da kare dalga ile değişik yönlerde manyetik doyuma ulaştırılır. Bu esnada manyetik nüve manyetize, manyetize değil, ters yönde manyetize, manyetize değil, manyetize gibi bir döngü içine girer. Bu devamlı alan değişimi nüve üzerine sarılan algılama bobininde elektik sinyalinin indüklemesine neden olur. Değişen manyetik alan (AC alan) haricinde herhangi bir DC alan mevcut değil ise sensörün giriş ve çıkış akımları eşit olacaktır. Fakat herhangi bir dış DC alanın uygulanması durumunda (dünya manyetik alanı gibi), manyetik nüve DC alan yönünde daha kolay mıknatıslanırken, DC alan ters yönünde daha zor mıknatıslanacaktır. Bu durum DC alan yokluğunda görülen giriş-çıkış sinyal uyumunun bozulmasına ve giriş sinyalinin harmoniklerinin oluşmasına neden olur. 2. harmonik sinyalinde düşük DC alan bölgesinde görülen mükemmel doğrusal DC alan bağımlılığı sensörün dinamik ölçeğini belirlemektedir.



Şekil 294. Farklı popüler fluxmetre tasarımı

Manyetik Akımetre

Fizikte özellikle elektromanyetizmada manyetik akı herhangi bir yüzeyden geçen manyetik alan B büyüklüğünün yüzeye dik bileşeni olarak tanımlanır ve Φ veya Φ_B sembolü ile gösterilir (Şekil 295). Manyetik akının SI sisteminde birimi weber (Wb) (türetilmiş birim volt-saniye), CGS sisteminde maxwell'dir.



Şekil 295. Yönü ile verilen yüzeydeki her bir nokta yüzey normali olarak adlandırılır. Bir noktadan geçen manyetik akı manyetik alanın bu yöndeki bileşenidir.

Manyetik akı genelde akımetre ile ölçülür. Akımetre manyetik akıyı ölçebilmek için hazırlanmış özel ölçüm bobinleri ile birlikte bu bobinler üzerindeki gerilim değişimini hesaplamak için tasarlanmış özel bir elektronik devreden meydana gelir. Manyetik alan sabit ise bir yüzeyden geçen manyetik akı;

$$\varphi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = B\,S\cos\theta \qquad (137)$$

ile ifade edilmektedir.

Manyetik akı'yı ölçebilmek için kullanılan akımetrelerdeki bobinlerin kesit alanı ve sarım sayısının bilinmesi durumunda herhangi bir manyetik alan büyüklüğünün ölçülmesi de mümkündür.



Şekil 296. Tipik bir akımetre cihazı görünümü

Manyetik Moment

Titreşen Örnek Manyetometresi (VSM)

Titreşen örnek manyetometresi (VSM) çalışma prensibi elektromanyetik indüksiyon yasasına dayanır. Elektromıknatıs aracılığı ile oluşturulan doğrusal bir manyetik alan içine yerleştirilen test numunesi mekanik olarak titreştirilir. Numune elektromıknatısın manyetik alanı sonucu mıknatıslandığından test bölgesindeki manyetik alan dağılımını periyodik olarak değiştirir. Periyodik alan değişimi numune etrafına yerleştirilmiş algılama bobinleri (pick-up coils) üzerinde gerilim indüklenmesine neden olur. Bu gerilimin büyüklüğü numunenin manyetik momenti ile doğru orantılı fakat uygulanan manyetik alan büyüklüğünden bağımsız olmaktadır. Böylece, manyetik moment lock-in yükseltici ile ölçülebilecek bir büyüklük olan elektriksel sinyale çevrilmiş olur.

Modern VSM'ler 10^{-6} emu'dan (hatta 10^{-7} emu) birkaç yüz emu'ya kadar geniş bir dinamik ölçekte çalışabilmektedir. Manyetik alan kaynağı olarak ticari bir elektromıknatıs kullanıldığında maksimum uygulanabilir manyetik alan büyüklüğü 2 T'ya ulaşabilir. Bazı ticari VSM modellerinde süperiletken mıknatıs kullanılmakta ve 7 T ve daha yüksek değerlerde manyetik alan oluşturulabilir. VSM manyetometrelerin SQUID manyetometrelere nazaran avantajı daha hızlı ölçüm yapabilme yeteneğidir. Numuneye ait herhangi bir mıknatıslanma eğrisi 10 ile 30 dakika arasında elde edilebilir.

SQUID Manyetometre

SQUID ismi açık adı ile Superconducting Quantum Interference Device (Süperiletken Kuantum Girişim Cihazı) kelimelerinin baş harflerinden gelir. SQUID manyetometre çalışma prensibi süperiletken döngülerdeki manyetik akı kuantumlaması olarak bilinen kuantum etkisi olayına dayanır. SQUID sensör seri bağlı iki Josephson ekleminden (normal metal ve süperiletken yapının yan yana olması durumu) oluşur. Bu sensörler manyetik momenti 10^{-9} emu mertebelerine kadar ölçebilen en hassas manyetometrelerdir. Fakat üst limit olarak VSM kadar yüksek olamamakta ve sadece birkaç emu ile sınırlı kalmaktadır. Dahası SQUID manyetometrede yapılan ölçümler birkaç saati bulduğu için oldukça yavaştır. SQUID manyetometrelerin bir diğer dezavantajı ise süperiletken sensörlerin çalışabilmesi için gerekli olan sıvı helyum sıcaklığına soğutulması gerekliliğidir. Sıvı helyumun oldukça pahalı olması, ölçüm sisteminin karmaşıklığı ve özel bakım ve kullanıcı eğitimi gerektirmesi gibi unsurlar kullanım alanının genişlemesini engeller. Fakat diğer manyetometre tiplerinin hassasiyetinin yetmediği alanlarda SQUID manyetometre kullanılmakta ve dolayısı ile manyetizma alanındaki önemini sürdürür.

Uygun bir algılama bobini ile SQUID manyetometreler manyetik alan ölçümü için de kullanılabilir. 5 aT (5×10^{-18} T) gibi çok düşük manyetik alan büyüklükleri ölçülebilir [170]. Böyle bir hassasiyet biyolojik nesnelerin ya da insan beyninin elektriksel aktivitesinin incelenebilmesi için yeterlidir.

7.4.10 ELEKTRİK ALAN

7.4.10.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Fizikte elektrik alan, elektriksel yükü veya manyetik alanı çevreleyen uzayın bir özelliği olup, içerisinde bulunan yüklü nesnelere elektriksel güç aracılığı ile etki eder. Kavram, fiziğe Michael Faraday tarafından kazandırılmıştır.

Elektrik alan SI birimi Newton/Coulomb veya Volt/metre olan bir vektör alanıdır. SI temel birimleri cinsinden kg m s^{-3} A^{-1} olarak ifade edilir. Alanın belli bir noktadaki büyüklüğü o noktaya konacak 1 Coulomb'luk bir test yüküne ne kadar kuvvet uygulayacağıyla belirlenir, alanın yönü kuvvetin yönüdür.

Zamana göre değişen bir elektrik alan (mesela hareketli bir yüklü parçacık nedeniyle) yerel manyetik alana sebep olur. Bu, elektrik ve manyetik alanların birbirinden bağımsız olmadığını gösterir. Bu nedenle elektrik ve manyetik alanlardan ayrı ayrı bahsetmek yerine bu ikisi "elektromanyetizma" ya da "elektromanyetik alan" olarak, birlikte incelenir.

Elektrik alan, alan içinde belli bir noktada sabit duran noktasal yüke uygulanan, yük başına düşen kuvvet olarak tanımlanır. Vektörel bir büyüklük olduğundan, skaler büyüklüklerden ayırt edilebilmesi için sembolü kalın karakterler (**E**) ile veya üzerinde çizgi ($\bar{E}$) ile gösterilir. Bu gösterim şekli diğer tüm vektörel büyüklükler için de geçerlidir.

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q \tag{138}$$

Burada,

E : Parçacığın konumundaki elektrik alan vektörü [V/m]

F : Parçacık tarafından hissedilen elektriksel kuvvet vektörü [Newton]

Aslında bu eşitlik elektrik alanı alanda sadece durağan yükler olduğunda tanımlar. Dahası, alandaki yükler elektrik alanı değiştireceğinden, herhangi bir q yükünün varlığındaki elektrik alan o yük olmadığındaki elektrik alandan daha farklı olacaktır. Fakat mevcut bir yük dağılımından kaynaklanan elektrik alan bu alanı hissedecek hiçbir parçacık olmasa dahi tanımlıdır. Bu tanımlılık alana varsayımsal olarak yerleştirilen test yükü ile sağlanır. Bu sayede elektrik alan test yükü sıfıra yaklaşırken yükün hissedeceği kuvvet ile tanımlanır:

$$\mathbf{E} = \lim_{q \to 0} \frac{\mathbf{F}}{q} \tag{139}$$

Bu ifade elektrik alanın yalnızca kaynak yük dağılımına bağlı olmasını sağlar.

Elektrik alanın yönü pozitif yüklü parçacığın hissedeceği kuvvetin yönüyle aynı, negatif yüklü parçacığın hissedeceği kuvvetin yönünün zıddıdır. Aynı yükler birbirini çekip zıt yükler birbirini iteceğinden, pozitif yüklerin etrafındaki alanların dışarıyı gösterdiğini ve negatif yüklerin etrafındaki alanların içeriye doğru yöneldiğini söyleyebiliriz.

Birden fazla noktasal yükün ürettiği elektrik alan yüklerin ayrı ayrı ürettiği elektrik alanların süperpozisyonudur:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{n_q} \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^{n_q} \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \tag{140}$$

Alternatif olarak, Gauss yasası uzayda sürekli bir yük yoğunluğu dağılımının ürettiği elektrik alanı hesaplamamızı sağlar.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_o} \qquad (141)$$

ε_o : Boşluğun dielektrik sabiti [F/m]

ρ : Pozisyona bağlı olarak yük yoğunluğu [C/m^3]

Coulomb yasası esasen elektrik yük dağılımı ile bu dağılımdan kaynaklanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi gösteren Gauss yasasının özel bir halidir. Gauss yasası elektromanyetik teoriyi oluşturan dört Maxwell denklemlerinden biridir.

Her noktada aynı değere sahip olan elektrik alana sabit elektrik alan denir. İki paralel iletken levhaya potansiyel fark uygulanarak yaklaşık olarak elde edilebilir. Yaklaşık olmasının sebebi elektrik alanın köşelerde düzenli halinden uzaklaşmasıdır. Bu etkenleri ihmal edersek elektrik alan Eşitlik (142) ile ifade edilir:

$$E = \frac{V}{d} \qquad (142)$$

E : Elektrik alan [V/m]

V : Levhalar arası gerilim farkı [V]

d : Levhalar arası uzaklık [m]

Bu eşitlik sadece elektrik alanın büyüklüğünü vermektedir. Elektrik alanın yönü ise pozitif yüklü levhada negatif yüklü levhaya doğrudur.

Elektrik alan durağan bir yük tarafından üretilebileceği gibi değişen manyetik alanın sonucu olarak da oluşurlar:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \qquad (143)$$

ϕ : Skaler elektrik potansiyeli [V]

A : Manyetik vektör potansiyeli [V s m^{-1}]

Aynı zamanda

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \qquad (144)$$

vektörü manyetik akı yoğunluğunu (**B**) verir. Elektrik alan denkleminin rotasyonelini alırsak,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad (145)$$

Bu eşitlik Maxwell denklemlerinden biridir. Faraday endüksiyon yasası olarak bilinir.

Elektrostatik durağan yükleri çevreleyen elektrik alanların bilimi iken manyetik alanın değişmesiyle oluşan elektrik alanlar elektrodinamik ve elektromanyetik konusudur.

Elektrik alan süperpozisyon prensibine uyar. Eğer birden fazla noktasal kaynak varsa herhangi bir noktadaki toplam elektrik alan bu noktasal kaynakların o noktada tek başına ürettiği elektrik alanların vektörel toplamıdır.

$$\mathbf{E}_{toplam} = \sum_i \mathbf{E}_i = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 \ldots \quad (146)$$

Bu kural sonsuz sayıda küçük yük elementi için genişletilirse toplam formülü integrale dönüşür:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \int \frac{\rho}{r^3} \mathbf{r}\, dV \quad (147)$$

Burada ρ pozisyona bağlı olarak yük yoğunluğunu yani birim hacme düşen yük miktarını verir. Bir noktadaki elektrik alan o noktadaki elektriksel potansiyelin negatif gradyanına eşittir:

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi \quad (148)$$

Φ verilen noktada elektriksel potansiyeli gösteren skaler alandır. Statik elektrik alan iletken ve dielektrik materyallerde çok farklı şekilde davranır. İletken içinde elektrik alan sıfır olmakla beraber bütün yükler yüzeyde toplanmak zorundadır. Buna karşı dielektrik malzemeyi oluşturan atomlar dış statik elektrik alan etkisi sonucu dipol momentuma sahip olurlar. Makroskopik ölçülerde bu etkilemeye dielektrik polarizasyon P denilir. Birçok durum için dielektrik polarizasyon P ve elektrik alan E arasında doğrusal bağlantı bulunur. Elektrik alan büyüklüğü atom içi elektik alan büyüklüğüne yaklaştığı durumlarda doğrusal olmayan etkilemeler meydana gelir. Pratikte bu tür yüksek değerlere sahip statik alan elde etmek oldukça zordur. Dielektrik malzemelerde elektrik etkilemeleri incelemek için elektrik alan ile birlikte elektrik indüksiyon (**D**) kullanılmaktadır.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (149)$$

D : Deplasman vektörü (C/m^2)

P : Dielektrik polarizasyon vektörü (C/m^2)

Yukarıda söylediğimiz şartlar altında bu iki fizik olgu arasında doğrusal bağlantı bulunur. İzotropik (her yönü eşit) malzemeler için elektrik alan ve indüksiyon arasındaki bağlantıyı elektrik geçirgenlik ε sağlamaktadır.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (150)$$

İzotropik olamayan materyallerde (örneğin kristalik yapılar) elektrik alan ve indüksiyon komponentler arasındaki lineer bağlantıyı dielektrik geçirgenlik tensörü sağlamaktadır.

Elektrik alan enerji depolar. Bir elektrik alanın enerji yoğunluğu aşağıdaki gibidir.

$$u = \frac{1}{2}\varepsilon |\mathbf{E}|^2 \quad (151)$$

u : Elektrik alanın enerji yoğunluğu [$joule/m^3$]

E : Elektrik alan vektörü [V/m]

ε : Alanın içerisinde bulunduğu yerin dielektrik katsayısı

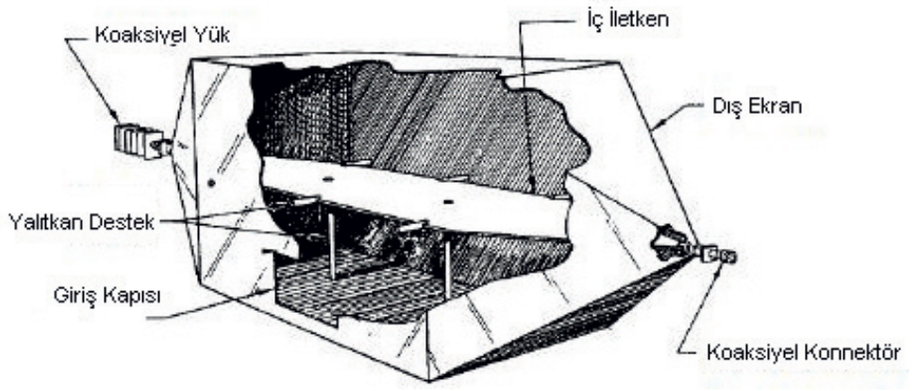
Belirli bir V hacminde depolanan toplam enerji (U), Eşitlik (152) ile ifade edilir [172].

$$U = \frac{1}{2}\varepsilon \int_V |\mathbf{E}|^2 dV \quad (152)$$

Eşitlikde dV, diferansiyel hacim elementidir.

Elektrik Alan Üretim Yöntemleri

Elektrik alan üretimi konusunda yaygın olarak kullanılan cihazların başında TEM hücreleri gelir. TEM hücreleri, insan sağlığı ve diğer cihazlar için tehlikeli ve zararlı olabilecek düzeyde dışarıya enerji yaymayan tamamen ekranlı cihazlardır. Şekil 297'de görüldüğü gibi TEM hücresinin ana bölümü, dikdörtgensel dış bir iletken ile merkezdeki düz bir septumdan oluşur. Bu septum, alt ve üst duvarların tam ortasında yer alır. TEM hücresinin ana bölümü ve daralan uçlarının boyutları öyle seçilmiştir ki hücrenin boyutu boyunca karakteristik empedansın yaygın olarak (Z_0) 50 Ω olması sağlanmıştır. TEM hücresi uygun olarak tasarlanıp, uygun olarak yansıma oluşturmayacak bir yükle sonlandırıldığında, yüksek dereceli yayın modlarının kesim frekanslarından daha düşük frekanslarda girişteki gerilim duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio-VSWR) değeri genellikle 1,5:1 değerinden küçük olmaktadır. Elektrik alanın üretildiği bölge, orta levha ile üst veya alt duvar arasındadır ve elektrik alan dikey olarak polarize olmuştur. Aynı zamanda, dalga empedansı boşluktaki 377 Ω değerine oldukça yakındır.



Şekil 297. TEM hücresinin yandan görünüşü [173]

TEM hücresinin orta noktasındaki elektrik alan Eşitlik (153) ile hesaplanır. Şayet manyetik alan bulunmak istenirse Eşitlik (154) kullanılır.

$$E = \frac{\sqrt{P_{net} Z_0}}{b} \qquad (153)$$

E : Elektrik alan [V/m]

P_{net} : TEM hücresi girişindeki/çıkışındaki net güç [W]

Z_0 : TEM hücresinin karakteristik empedansı [Ω]

b : TEM hücresinin plakalar arası mesafe [m]

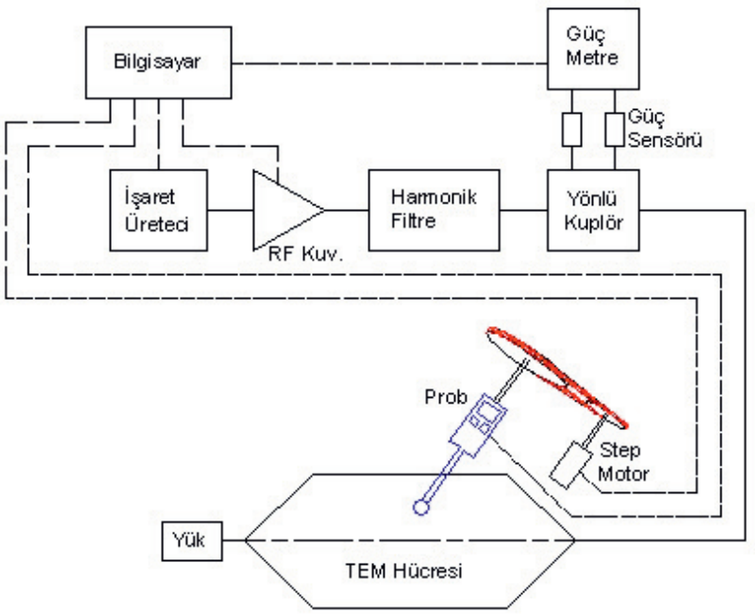
$$H = \frac{E}{\eta} \qquad (154)$$

H : Manyetik alan [A/m]

η : Serbest uzayın empedansı [Ω]

Bir örnek olarak TEM hücrelerinin elektrik alan üretiminde kullanımları elektrik alan problarının kalibrasyonları için Şekil 298'de gösterilmiştir. TEM hücresinde, DC – 700 MHz frekans aralığında elektrik alan problarının kalibrasyonları yapılabilmektedir. Sistemde kullanılan harmonik filtreler, ana frekansın harmoniklerini bastırmak için kullanılır. TEM hücresinin plakaları arasındaki teorik elektrik alanın üretimi için gerekli olan net güç değeri yönlü kuplörler üzerinden

okunarak kontrollü bir şekilde TEM hücresinin girişine uygulanır. Plakalar arasına yerleştirilen elektrik alan probunun ölçmüş olduğu değer ile TEM hücresinin plakaları arasında oluşturulan teorik elektrik alan değeri karşılaştırılarak probun faktörü elde edilir. Şayet bir ortogonal dipol prob kalibre ediliyorsa step motor ile istenilen açılarda döndürülerek maksimum ve minimum yöntemi kullanılarak frekans cevabı, doğrusallık ve izotropi ölçümleri yapılır.



Şekil 298. TEM hücresi kullanımı ile elektrik alan üretimi ve elektrik alan sensör kalibrasyonu

Elektrik alan üretimi için kullanılan diğer önemli cihaz antendir. Anten konusu elektrik alan üretimi için çok önemli ve geniş bir kavram olduğundan antenler "Anten Kavramı ve Elektrik Alan Üretimi/Ölçümü" bölümünde detaylı olarak incelenmiştir. Burada ise kısaca elektrik alan üretimi konusunda birçok alanda yaygın olarak kullanılan verici antenlerden bahsedilecektir. Laboratuvar ortamlarında çubuk, bikonik, log-periyodik ve horn antenler elektrik alan üretiminde yaygın olarak kullanılır. Verici antenlerin belli bir mesafe oluşturacakları elektrik alan uzak alan şartlarında Eşitlik (155) ile ifade edilir.

$$E=\sqrt{\frac{P\,\eta\,g}{4\pi\,d^2}} \qquad (155)$$

E : Elektrik alan [V/m]

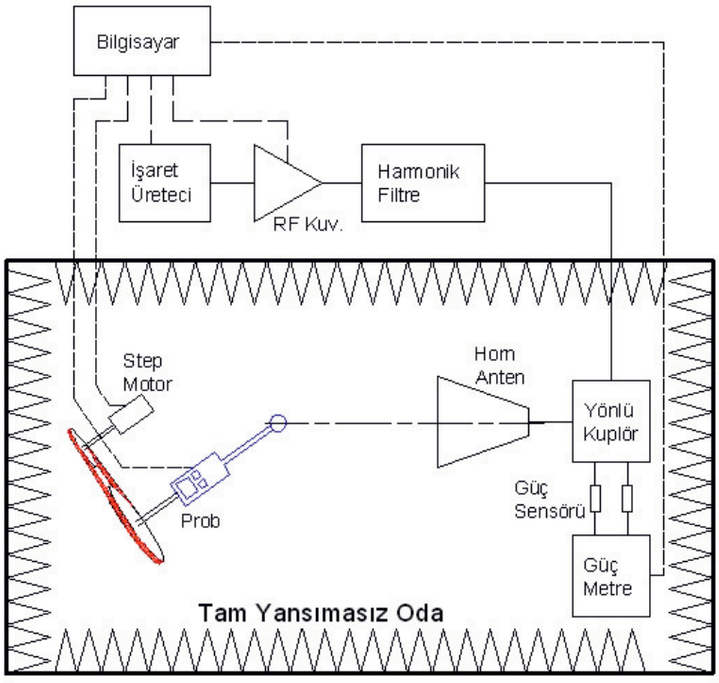
η : Serbest uzayın empedansı [Ω]

P : Anten girişindeki güç [W]

g : Anten kazancı [birimsiz]

d : Mesafe [m]

Antenlerin elektrik alan üretiminde kullanımına örnek olarak horn anten kullanımı ile elektrik alan sensör kalibrasyonları verilebilir. Şekil 299'da verilen düzenekte görüldüğü üzere belirli mesafedeki teorik elektrik alan için gerekli net güç değeri anten girişindeki yönlü kuplör aracılığı ile kontrollü olarak horn antene uygulanır. Nihai olarak, kalibre edilen probun göstermiş olduğu değerler ile teorik elektrik alan değeri karşılaştırılarak probun düzeltme faktörüne ulaşılır. Burada da RF kuvvetlendiriciden gelen ana frekansın harmoniklerini bastırmak için filtre kullanılmaktadır.



Şekil 299. Horn anten kullanımı ile elektrik alan üretimi ve elektrik alan sensör kalibrasyonu

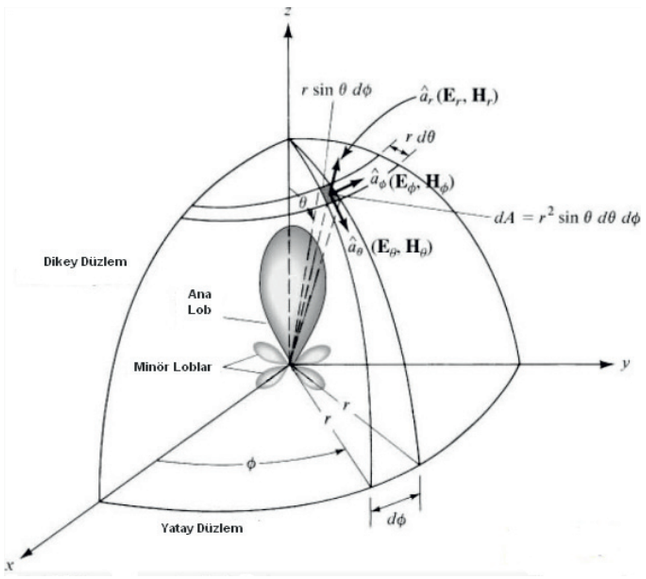
7.4.10.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Elektrik alan seviyesinin ölçümü için birçok ticari ve askeri ulusal ve uluslararası standartlar mevcuttur. Elektrik alan seviyesinin ölçümü için en önemli standartlar EN 55022 [174] ve EN 55011 [175] olup Elektromanyetik Uyumluluk Direktifi [176] kapsamında test edilen ticari cihazlardan yayılan elektrik alan seviyelerinin ölçümü için kullanılır. Elektrik alan seviyesinin ölçümü için diğer önemli standart MIL-STD 461 [177] olup askeri cihazlardan yayılan elektrik alan seviyelerinin denetimi için kullanılmaktadır. Bahsedilen cihaz testlerinde yoğun bir şekilde elektromanyetik dalgaları elektriksel işaretlere dönüştüren anten denilen alıcı cihazlar kullanılır.

Anten Kavramı ve Elektrik Alan Üretimi / Ölçümü [178]

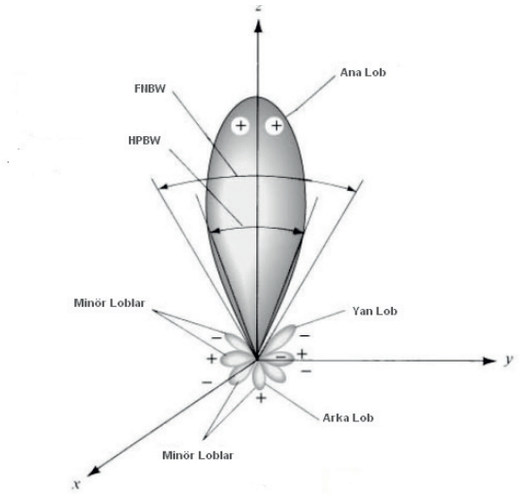
Anten dönüştürme işlemi yapan bir cihazdır. Bir verici anten girişlerindeki gerilimi (V), EM dalgalara (V/m) dönüştürür. Alıcı anten ise bu işlemin tam tersini yapar. Bir anten için en önemli parametreler anten deseni, anten yönlendiriciliği, anten kazancı, ışıma şiddeti, ışınan güç ve anten faktörü kavramlarıdır.

İlk olarak “Anten Deseni” tanımlaması ile başlayalım. “Anten Deseni” küresel koordinatların bir fonksiyonunda bir antenin ışıma özelliklerinin grafiksel veya matematiksel gösterimi olarak tanımlanır. Birçok durumda, ışıma deseni uzak alan bölgede tanımlanır ve koordinat parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Desen gösterimi için uygun koordinat seti Şekil 300’de gösterilmiştir.



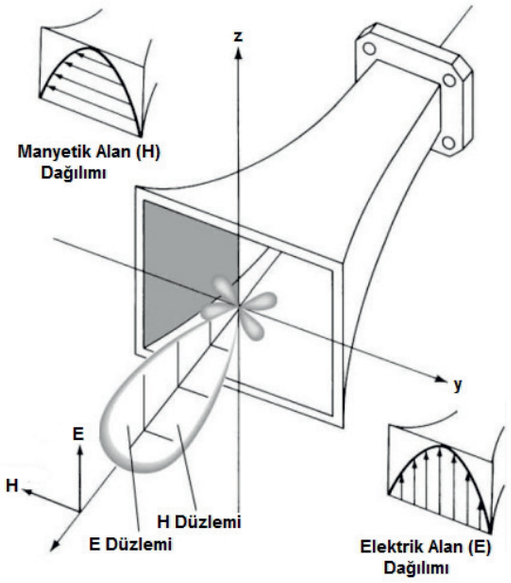
Şekil 300. Desen gösteriminde kullanılan koordinat sistemi [178]

Belli bir yarıçapta alınan elektrik ve manyetik alanının çizimi "Alan Genlik Deseni" olarak isimlendirilir. Diğer yandan sabit bir yarıçap boyunca güç yoğunluğunun uzaysal değişiminin grafiği "Güç Deseni" olarak isimlendirilir. Genellikle alan ve güç desenleri maksimum değere göre normalize edilerek gösterilir. Aynı zamanda, güç desenleri genellikle logaritmik skalada decibel (dB) olarak çizilir. Logaritmik skala genellikle lineer skalaya göre tercih edilir çünkü desen grafiğindeki çok küçük değerdeki bölgeler, örneğin minör loblar, çok daha detaylı görülürler. Desende görülen maksimum gücün değerinin yarısına düştüğü noktalar arasındaki küçük açıya "Yarı Güç Işıma Açısı (Half Power Beam Width - HPBW)" adı verilir. Bir lineer güç deseni için ise maksimum değerin % 50'sine düştüğü değerler arasındaki açıdır. Desibel güç deseni için ise maksimum değerin –3 dB azaldığı noktalar arasındaki açıdır. Anten desenleri lob adı verilen parçalardan oluşur. Bu loblar majör (veya ana), minör, yan ve arka lob isimleriyle alt parçalara ayrılır. Her bir lobun çevresi çok düşük seviyedeki ışıma yoğunluklarıyla kaplıdır. Zaten lobları birbirinden ayıran aralarındaki nerdeyse sıfıra yakın düşük seviyeli bölgelerdir. (Şekil 301), 3 boyutlu simetrik bir desen örneğini göstermektedir. Bu örnek incelediğinde maksimum elektrik alan ışımasının z yönünde olduğu görülür.



Şekil 301. Üç boyutlu simetrik bir desen örneği [178]

Lineer polarize olmuş bir anten için, E düzlemi ve H düzlemi desenleri ifadesi sıklıkla kullanılır. E düzlemi, elektrik alan vektörünü içeren ve maksimum yayınımın olduğu düzlemdir. H düzlemi ise manyetik alan vektörünün bulunduğu ve maksimum yayınımın olduğu düzlemdir. Bu durum en iyi bir örnekle açıklanır. Şekil 302'de verilen örnekte x-z düzlemi (dikey düzlem, ϕ = 0), E düzlemidir. x-y düzlemi (yatay düzlem, $\theta = \pi/2$) ise H düzlemidir. Çünkü bu düzlemeler sırasıyla E ve H vektörlerini taşıyan düzlemler olup aynı zamanda maksimum yayınımın olduğu düzlemlerdir.



Şekil 302. Yönlü bir anten ve deseni [178]

Bir anteni saran 3 uzay bölgesi bulunur. Bunlar, reaktif yakın alan bölgesi, aktif (ışınan) yakın alan bölgesi (Fresnel), uzak alan (Fraunhofer) bölgesidir. Bu bölgelerin her birinin içindeki elektromanyetik alan yapısı farklıdır. Reaktif yakın alan bölgesi antenin hemen civarında bulunan, reaktif alanın baskın olduğu bölgedir. Birçok anten için, $R < 0{,}62\sqrt{D^3/\lambda}$ bölgesi reaktif yakın alan bölgesi kabul edilir. Bu ifadede, D antenin en büyük boyutu ve λ dalga boyudur. Aktif (ışınan) yakın alan bölgesi ise reaktif yakın alan bölgesi ve uzak alan bölgesi arasındaki geçiş alanı bölgesidir. Antenin boyutları dalgaboyu ile karşılaştırılabilir büyüklükte ise bu bölge var olmayabilir. Eğer antenin boyutları dalgaboyuna oranla çok küçük ise, bu bölge mevcuttur ve $R \geq 0{,}62\sqrt{D^3/\lambda}$ ile $R < 2D^2/\lambda$ sınırları arasında kaldığı kabul edilir. Bu alanı uzak alan bölgesinden ayıran en önemli özellik, bu bölgede açısal alan dağılımı antenden R uzaklığına bağımlıdır. Uzak alan bölgesinde açısal alan dağılımı artık antenden uzaklığa (R) bağımlı değildir. Yani antenin ışıma deseni, R parametresine bağlı değildir ve desen şekli R değiştikçe değişmez. Birçok anten için uzak alan ifadesi $R > 2D^2/\lambda$ 'dir.

Anten elektromanyetik dalga güç taşımaktadır. Elektromanyetik dalga ile ilişkili gücü tanımlamakta kullanılan ifade anlık "Poynting" vektörüdür ve Eşitlik (156) ile ifade edilir:

$$\bar{w} = \bar{e} \times \bar{h} \qquad (156)$$

$\bar{w}$: Anlık poynting vektörü [W/m^2]

$\bar{e}$: Anlık elektrik alan şiddeti [V/m]

$\bar{h}$: Anlık manyetik alan şiddeti [A/m]

Poynting vektörü bir güç yoğunluğu ifadesi olduğundan dolayı, toplam güç, kapalı bir yüzey üzerinde poynting vektörünün normal komponentinin integre edilmesi ile bulunur:

$$p = \oiint_S \bar{w} \cdot \bar{ds} = \oiint_S \bar{w} \cdot \bar{n}\, da \tag{157}$$

p : Anlık toplam güç [W]

$\bar{n}$: Yüzeye normal birim vektör

da : Kapalı yüzeydeki sonsuz küçük alan parçası [m^2]

Zamanla değişen alan uygulamalarında, poynting vektörünü bir periyotta integre edip, periyoda bölerek ortalama güç yoğunluğunun bulunması istenmektedir. Şimdi anlık elektrik ve manyetik alan ifadelerini zaman domeninde yazalım. E ve H ifadeleri, e ve h'ın fazör ifadeleri olsunlar. e ve h ifadeleri,

$$\bar{e}(x,y,z;t) = \mathrm{Re}\left[\bar{E}(x,y,z)e^{jwt}\right] \tag{158}$$

$$\bar{h}(x,y,z;t) = \mathrm{Re}\left[\bar{H}(x,y,z)e^{jwt}\right] \tag{159}$$

olarak yazılır. Bu noktada,

$$\mathrm{Re}\left[\bar{E}\,e^{jwt}\right] = \frac{1}{2}\left[\bar{E}\,e^{jwt} + \bar{E}^{*}\,e^{-jwt}\right] \tag{160}$$

eşitliğini kullanarak,

$$\bar{w} = \bar{e}\,x\,\bar{h} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\bar{E}\,x\,\bar{H}^{*}\right] + \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\bar{E}\,x\,\bar{H}\,e^{j2wt}\right] \tag{161}$$

elde ederiz. İlk terim zamanın fonksiyonu değildir ve ikinci terimin zamanla değişimi, frekansın 2 katıdır. Poynting vektörünün zamanla değişimi,

$$\bar{W}_{av}(x,y,z) = \left[\bar{w}(x,y,z;t)\right]_{av} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\bar{E}\,x\,\bar{H}^{*}\right] \tag{162}$$

olur.

Eşitlik (162)'deki "1/2" ifadesi E ve F alanlarının tepe değerleri göstermesinden dolayı, bu değerleri RMS'e çevirmek için kullanılmıştır. Dikkat edilirse yukarıdaki ifadede (ExH^{*})/2 ifadesinin reel kısmı kullanılır ve bunun ortalama güç yoğunluğunu verdiği söylenmiştir. Bu çarpımın sanal kısmı ise yayılmayıp depo edilen reaktif enerji yoğunluğunu simgelemektedir. Bir antenin uzak alanında reaktif enerji ihmal edilebilir bir seviyede olduğu düşünülebilir çünkü reaktif enerji tamamen kaynağa yakın bölgelerde baskındır. Artık bir antenden yayılan ortalama güç, diğer adıyla ışınan güç, az önce bulunan güç yoğunluğu ifadesinin kapalı yüzey üzerinde integralini alarak,

$$P_{rad} = P_{av} = \oiint_S \bar{W}_{rad} \cdot \bar{ds} = \oiint_S \bar{W}_{av} \cdot \bar{n}\, da = \frac{1}{2} \oiint_S \mathrm{Re}\left[\bar{E} \times \bar{H}^*\right] ds \qquad (163)$$

bulunur.

Bir izotropik anten ideal bir kaynaktır ve her yönde eşit yayınım yapar. Bu tür bir anten veya kaynak pratikte var olmamasına karşın, diğer antenler için iyi bir referans olur. İzotropik antenin simetrik yayınımı nedeni ile onun poynting vektörü küresel koordinatlardaki θ ve ϕ' nin bir fonksiyonu olmayacaktır. Ek olarak, sadece R bileşeni olacaktır. Böylece izotropik bir kaynak için,

$$P_{rad} = \oiint_S \bar{W}_o \, \bar{ds} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[\bar{a}_r \, W_o(r)\right] . \left[\bar{a}_r \, r^2 \sin\theta d\theta d\phi\right] = 4\pi r^2 W_o \qquad (164)$$

olur ve izotropik anten için güç yoğunluğu,

$$\bar{W}_o = \bar{a}_r \, W_o = \bar{a}_r \left(\frac{P_{rad}}{4\pi r^2}\right) \qquad (165)$$

elde edilir. Bu değer r yarıçaplı kürenin yüzeyinde düzgün olarak yayılmıştır.

Bir anten için diğer bir önemli parametre ışıma şiddeti (radiation intensity) olup, verilen bir yöndeki birim katı açı için bir antenden ışınan güçtür. Bu bir uzak alan parametresidir ve U ile ifade edilir. U, ışınım yoğunluğunun antenden olan uzaklığın karesine bölümü ile kolayca bulunur.

$$U = r^2 W_{rad} \qquad (166)$$

U : Işınım şiddeti [W / birim katı açı]

W_{rad} : Işınım yoğunluğu [W/m^2]

r : Mesafe [m]

Yayınım şiddeti bir antenin uzak alan elektrik alan ifadesiyle aşağıdaki gibi ilişkilidir:

$$U(\theta,\phi) = \frac{r^2}{2\eta} \left|\bar{E}(r,\theta,\phi)\right|^2 \approx \frac{r^2}{2\eta} \left[\left|E_\theta(r,\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\phi(r,\theta,\phi)\right|^2\right] \approx \frac{1}{2\eta} \left[\left|E_\theta^o(\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\phi^o(\theta,\phi)\right|^2\right] \qquad (167)$$

$\bar{E}(r,\theta,\phi)$: Antenin uzak alandaki elektrik alan şiddeti [V/m] = $\bar{E}^o(\theta,\phi)\frac{e^{-jkr}}{r}$

E_θ, E_ϕ : Bir antenin uzak alandaki elektrik alan komponentleri [V/m]

η : Ortamın karakteristik empedansı [Ω]

Antenin uzak alan ifadesi incelendiği için dikkat edilirse yukarıda E_r ifadesi sıfır kabul edilmiştir. Aslında burada belirtilmesi gereken en önemli şey, antenin güç deseni yayınım şiddetinin bir ölçüsü olduğudur. Kısacası bir antenin güç deseni yayınım şiddeti (U) ifadesi kullanılarak çizilir. Antenden yayınan toplam güç U cinsinden Eşitlik (168) ile bulunur.

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U \, d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \qquad (168)$$

$d\Omega$: Katı açı elemanı ($\sin\theta d\theta d\phi$)

İzotropik bir anten veya kaynak için U, θ ve ϕ ' den bağımsız olacaktır. İzotropik bir anten veya kaynak için anten gücü Eşitlik (169), ışınım şiddeti ise Eşitlik (170) ile ifade edilir.

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U_o d\Omega = U_o \oiint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_o \qquad (169)$$

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi} \qquad (170)$$

Anten için diğer bir parametre yönlendiriciliktir. Yönlendiriciliğin en yaygın tanımı, belirli bir yöndeki ışıma şiddetinin tüm yönlerdeki ortalama ışıma şiddetine oranı olarak verilir. Ortalama ışıma şiddeti, antenden ışıyan toplam gücün 4π'ye oranlanması ile bulunur. Eğer yönlendiricilikten bahsedilirken herhangi bir yön bilgisi verilmezse maksimum ışımanın gerçekleştiği yönden söz edildiği farz edilir. İzotropik olmayan bir kaynağın yönlendiriciliğini daha basit ve net bir şekilde tanımlamak istersek, bu kaynağın bir yöndeki ışıma şiddetinin izotropik kaynak üzerindekine oranıdır:

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi}{P_{rad}} \qquad (171)$$

Eğer herhangi bir yön verilmezse,

$$D_{max} = D_o = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \qquad (172)$$

olur.

D : Yönlendiricilik [birimsiz]

D_o : Maksimum yönlendiricilik [birimsiz]

U : Işıma şiddeti [W/Birim katı açı]

U_{max}: Maksimum ışıma şiddeti [W/Birim katı açı]

U_o : İzotropik kaynağın ışıma şiddeti [W/Birim katı açı]

P_{rad} : Toplam ışınan güç [W]

Bir izotropik kaynak için, açıktır ki U, U_{max}, U_o ifadeleri birbirine eşittir.

Antenler için diğer önemli parametre verimlilik olup Eşitlik (173) ile ifade edilir. Toplam anten verimliliği e_o, anten girişindeki ve yapısındaki kayıpları hesaba katmak için kullanılmaktadır. Bahsedilen kayıplar iletim hattı ve anten arasındaki empedans uyuşmazlığını ve $I^2 R$ iletimsel veya dielektriksel kayıplarını kapsar.

$$e_o = e_r e_c e_d \quad (173)$$

e_o : Toplam verimlilik [birimsiz]

e_r : Uyuşmazlık verimliliği $(1-|\Gamma|^2)$ [birimsiz]

e_c : İletim verimliği [birimsiz]

e_d : Dielektrik verimliliği [birimsiz]

Γ : Anten girişindeki gerilim yansıma katsayısı [birimsiz]

$$\Gamma = \frac{(Z_{in} - Z_o)}{(Z_{in} + Z_o)} \quad (174)$$

Z_{in} : Anten giriş empedansı [Ω]

Z_o : İletim hattı karakteristik empedansı [Ω]

Gerilim durağan dalga oranı (WSVR) ise Eşitlik (175) ile ifade edilir.

$$\text{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (175)$$

Ayrıca şunu ifade etmek gerekir ki e_c ve e_d hesaplanması oldukça zor ifadeler olup genellikle deneysel olarak ölçülmesi gereklidir ve bunları birbirinden ayırmak ölçümler ile bile olsa oldukça zordur. Bu nedenle genellikle tek bir parametre ile ifade edilirler. Verimlilik ifadesi tekrar yazılırsa,

$$e_o = e_r e_{cd} = e_{cd}(1-|\Gamma|^2) \quad (176)$$

olur. Burada,

$$e_{cd} = e_c e_d \quad (177)$$

dir.

Bu noktadan itibaren yönlendiricilik ile çok yakın ilişkili olan bir başka terim olan “Kazanç” ifadesi incelenecektir. Bu ifade yönlendiricilik ile birlikte verimliliği de içine alan daha kapsamlı bir ifadedir. Daha önce belirtildiği üzere yönlendiricilik sadece antenin yönsel özelliklerini tanımlayıp, antenin deseni tarafından belirlenmektedir. Antenin kazancı Eşitlik (178) ile ifade edilir.

$$G = \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}} \quad (178)$$

G : Anten kazancı [birimsiz]

$U(\theta, \phi)$: Herhangi bir yöndeki ışınım şiddeti [W/birim katı açı]

P_{in} : Anten tarafından kabul edilen toplam giriş güç [W]

P_{in} ile P_{rad} arasındaki ilişki Eşitlik (179) ile ifade edilir.

$$P_{rad} = P_{in}\, e_{cd} \tag{179}$$

IEEE standartlarına göre kazanç empedans uyuşmazlıklarından kaynaklanan kayıpları içermemektedir. Bu noktadan itibaren kazanç ifadesi yaygın kullanımı nedeni ile "Mutlak Kazanç (G_0)" olarak isimlendirilir. Bu şekilde farklı isimlendirme kullanılmasının sebebi bazı kaynaklarda kazanç ifadesine anten girişinde empedans uyuşmazlığından kaynaklanan kayıplarında dahil edilmesidir. Eşitlik (179)'u kullanarak, Eşitlik (178)'i düzenlersek,

$$G(\theta,\phi) = e_{cd}\left[4\pi \frac{U(\theta,\phi)}{P_{rad}}\right] \tag{180}$$

$$G(\theta,\phi) = e_{cd} D(\theta,\phi) \tag{181}$$

Elde edilir. Bu durumda,

$$G(\theta,\phi)_{max} = e_{cd} D(\theta,\phi)_{max} \tag{182}$$

olur. Yine benzer şekilde maksimum mutlak kazanç, maksimum yönlendiriciliğe bağlı olarak Eşitlik (183) ile ifade edilir.

$$G_o = e_{cd}\, D_o \tag{183}$$

Burada elde edilen önemli diğer sonuç, eğer anten üzerindeki iletimsel ve dielektriksel ısıl kayıplar deneysel olarak ölçülmek istenirse antenin mutlak kazancı antenin yönlendiriciliğine oranlanmalıdır:

$$e_{cd} = \frac{G_o}{D_o} \tag{184}$$

Anten üzerinde harcanan ısıl kaybı desibel biriminde ifade edersek,

$$T(dB) = G_o(dB) - D_o(dB) \tag{185}$$

olacaktır. Burada T(dB), desibel biriminde anten üzerinde ısısal olarak kaybolan gücü simgelemektedir. Mutlak kazanç ifadesi Eşitlik (186) ile desibel birimi cinsinden ifade edilir.

$$G_o(dB) = 10\log[e_{cd} D_o] \tag{186}$$

Nihai olarak elektrik alan ölçümleri için hayati bir terim olan anten faktörünün tanımı yapılacaktır. Anten Faktörü (AF), antene gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeninin (E), antenin bağlı olduğu hat üzerindeki gerilime (V) oranı, yani,

$$AF = \frac{E}{V} \tag{187}$$

olarak tanımlanır.

AF : Anten faktörü [1/m]

E : Elektrik alan şiddeti [V/m]

V : Gerilim [V]

Anten faktörünün desibel gösterimi,

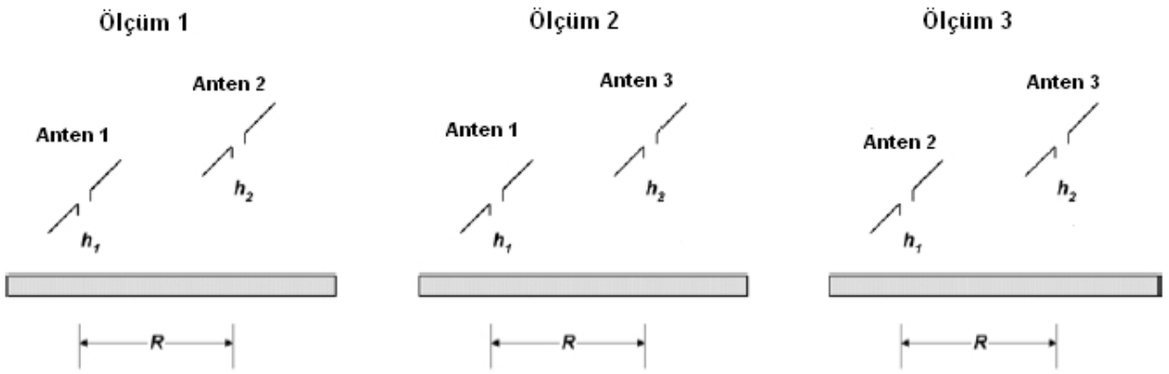
$$AF(dB) = E(dB\mu V/m) - V(dB\mu V) \quad (188)$$

olacaktır. Mutlak kazanç ve anten faktörü arasındaki ilişki ise, (50 Ω alıcı için)

$$G_o(dB) = 20\log(f_{MHz}) - AF(dB) - 29{,}79 \quad (189)$$

olarak ifade edilir.

Anten faktörü kavramı elektrik alan ölçümleri için çok hayati bir kavram olduğundan anten faktörü tespiti hassas elektrik alan ölçümleri için çok önemlidir. Bu nedenle bu bölümde ayrıca anten faktörü ölçümünde önemli bir metot olan üç anten metodundan kısaca bahsedilecektir. Bu yöntem, ANSI IEEE C63.5 [179] standardı tarafından önerilen 3 antenin kullanımı ile 3 antenin de anten faktör (dB) bilgilerine ulaşan bir yöntemdir. Yöntem, Şekil 303'de görüldüğü üzere 3 farklı ölçüm düzeneğinden oluşmaktadır.



Şekil 303. ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi gösterimi [179]

Üç anten yöntemi, NSA (Normalize Edilmiş Site Zayıflatması) değeri ± 2 dB 'den daha iyi olan bir ASDA (Açık Saha Deney Alanı) gerektirir. Bu yöntemde, antenlerin yatay polarizasyonda ve aralarındaki mesafenin (R) 10 m olduğu durum, diğer tüm durumlara göre en iyi uzak alan anten faktörlerini verecektir. Özellikle, antenlerin yatay polarizasyonda olması, ölçümün saha değişimlerine daha duyarsız olmasını sağlayacaktır. Bu nedenle ölçümler sırasında 1 GHz 'in altındaki frekanslar için yatay polarizasyon ve 10 m ölçüm mesafesi önerilir. Alıcı anten ise ölçümlerde 1 m – 4 m arasında taranarak maksimum alım seviyesi tespit edilir. 1 GHz üstü frekanslarda ise, ölçümlerdeki tüm antenlerin yerden yüksekliğinin 2 m, antenler arası mesafenin (R) 3 m, polarizasyonun yatay polarizasyon ve metal zeminin yutucu malzemeler ile kaplanması istenilir.

ANSI IEEE C63.5 standardında üç anteninde faktörlerine aşağıdaki eşitliklerle ulaşılır.

$$A_1 = A_{1_uygulanan} - A_{1_okunan} - A_{1_yol}$$

$$A_2 = A_{2_uygulanan} - A_{2_okunan} - A_{2_yol}$$

$$A_3 = A_{3_uygulanan} - A_{3_okunan} - A_{3_yol} \quad (190)$$

$$AF_1 = 10 \log f_{MHz} - 24{,}6 + 0{,}5\left[E_D^{max} + A_1 + A_2 - A_3\right]$$

$$AF_2 = 10 \log f_{MHz} - 24{,}6 + 0{,}5\left[E_D^{max} + A_1 + A_3 - A_2\right]$$

$$AF_3 = 10 \log f_{MHz} - 24{,}6 + 0{,}5\left[E_D^{max} + A_2 + A_3 - A_1\right]$$

E_D^{max} : Standart içinde değeri verilen maksimum alınan sinyal seviyesi (dBμV/m)

AF_1, AF_2, AF_3 : 1, 2 ve 3 numaralı antenlerin anten faktörleri (dB/m)

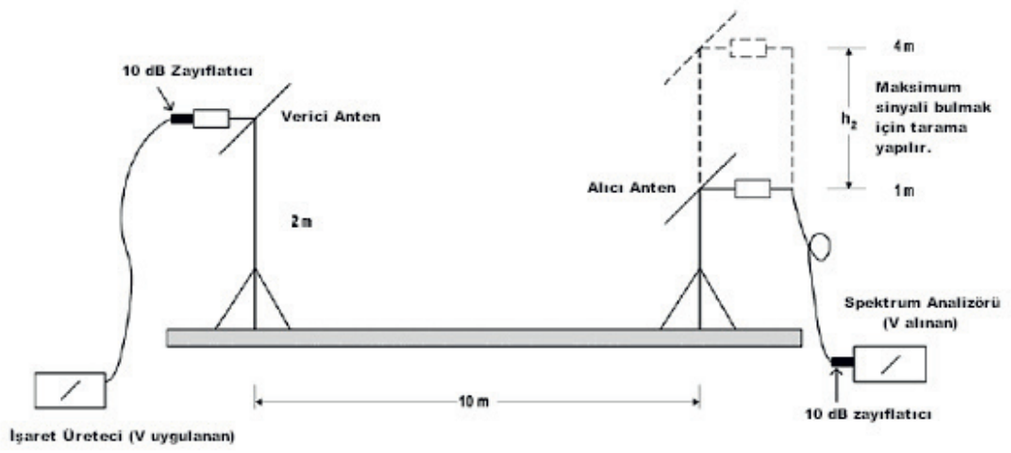
A_1, A_2, A_3 : Şekil 303 ve Şekil 304'deki ölçüm düzenekleri ile ölçülen alan zayıflatmaları

$A_{1_uygulanan}, A_{2_uygulanan}, A_{3_uygulanan}$: Şekil 303 ve Şekil 304'deki ölçüm düzeneklerinde işaret üreteci tarafından uygulanan seviye (dBμV)

$A_{1_okunan}, A_{2_okunan}, A_{3_okunan}$: Şekil 303 ve Şekil 304'deki ölçüm düzeneklerinde spektrum analizörü tarafından okunan seviye (dBμV)

$A_{1_yol}, A_{2_yol}, A_{3_yol}$: Şekil 303 ve Şekil 304'deki ölçüm düzeneklerinde kullanılan kablolar, zayıflatıcılar ve varsa ön kuvvetlendiriciler dahil olmak üzere işaret üreteci-verici anten ve alıcı anten-spektrum analizörü arasında kullanılan yolun toplam kaybı (dB)

f_{MHz} : MHz biriminde frekans değeridir.



Şekil 304. ANSI IEEE C63.5 üç anten yönteminde bir anten çiftinin ölçümü [179]

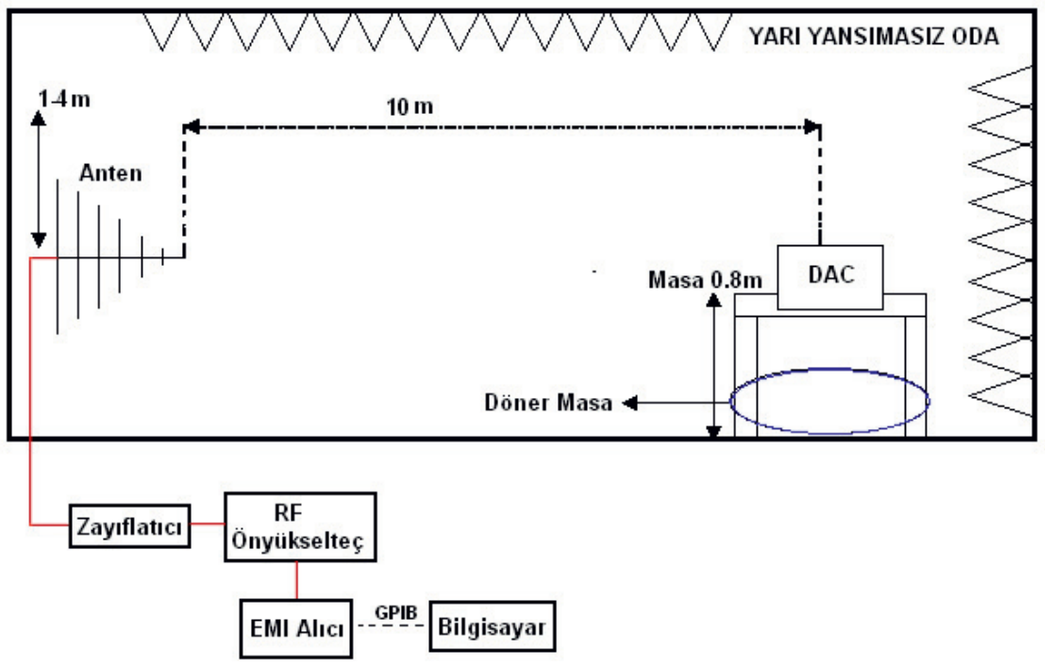
Işınımla Yayınım Ölçümleri

Işınımla yayınım ölçümleri EMC direktifi kapsamında, günlük yaşantımızda kullandığımız cihazlardan yayılan elektrik alan seviyelerinin tespiti için kullanılan ölçümlerdir. Bu konudaki önemli standartlar EN 55022, EN 55011 ve askeri standart MIL-STD 461 olup her iki standardın öngördüğü düzenekler sırasıyla

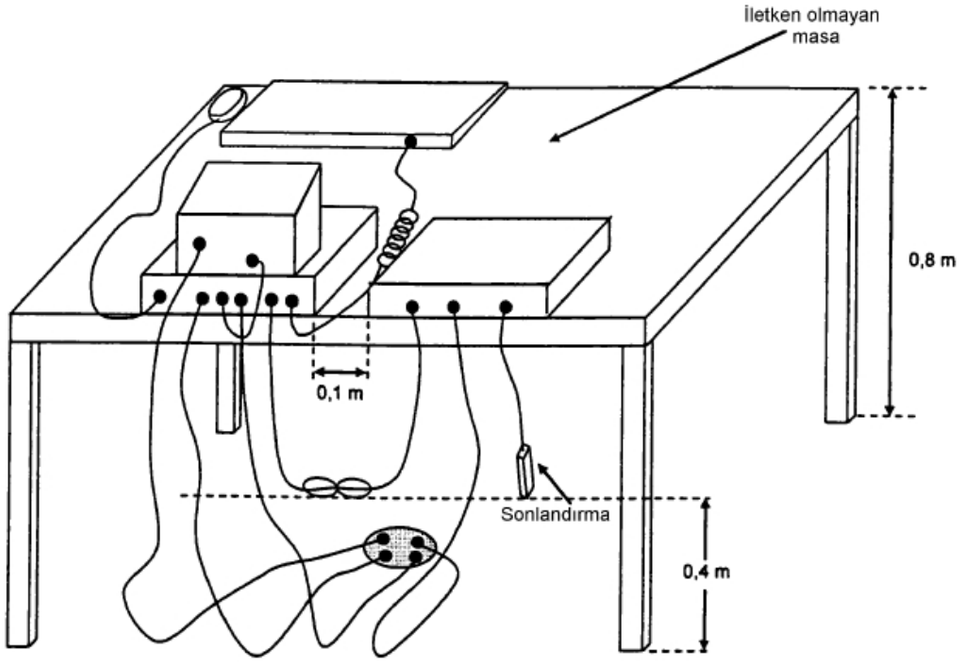
Şekil 305, Şekil 306 ve Şekil 307'de sunulmuştur. EN 55022 standardı deney altındaki cihazlardan yayılan elektrik alanların 30 MHz – 6 GHz frekans aralığında 3 m, 10 m veya 30 m mesafelerde ölçülmesini gerektirirken askeri MIL-STD 461 standardı ise 10 kHz – 18 GHz aralığında 1 m ölçüm mesafesi öngörmektedir. Ayrıca EN 55022 standardı deney altındaki cihazdan yayılan elektrik alan seviyesini maksimum tespiti için 360^{o} dönebilen bir döner masa ve 1 m - 4 m aralığında hareket eden bir anten ayağının kullanımını zorunlu kılmaktadır. MIL-STD 461 standardındaki uygulama ise sabit yönden sabit yükseklikte bir uygulama olup herhangi bir döner deney masası ve hareketli anten ayağı zorunlulukları bulunmamaktadır. Bir örnek olarak EN 55022 standardının ön gördüğü ölçüm limitleri Tablo 19'da sunulmuştur. Elektrik alan ölçümü için gereken düzeneklerdeki deney altındaki cihaz (DAC) gerekleri ise Şekil 306 ve Şekil 308'de gösterilmektedir.

Tablo 19. EN 55022 elektrik alan limitleri

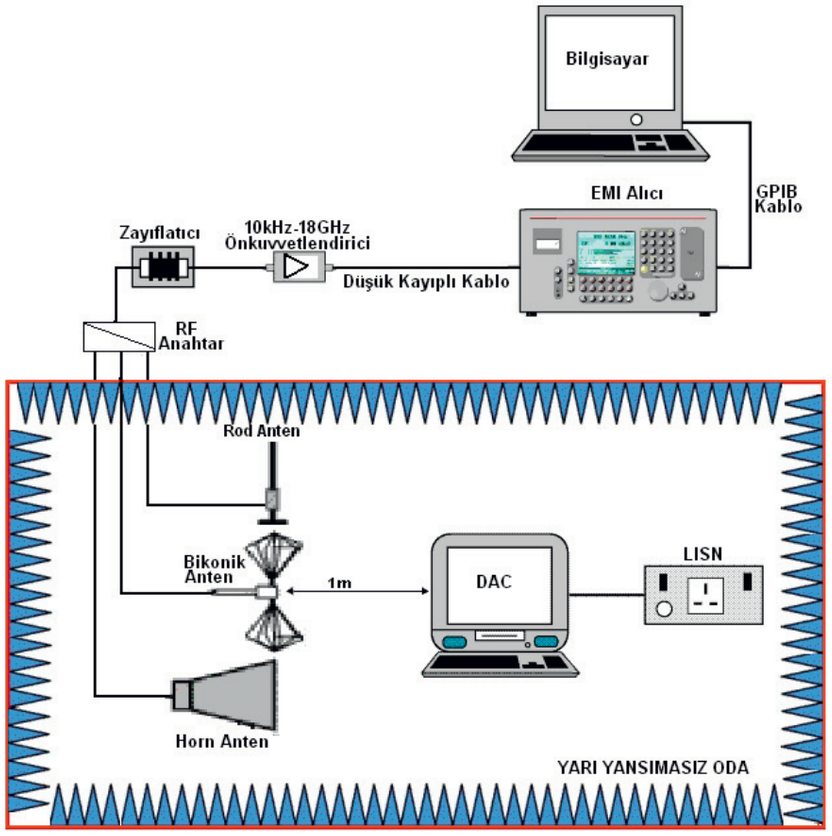
Frekans Aralığı MHz	Sözde Tepe Sınır Değerleri dB(µV/m)	
	3 m Ölçüm Mesafesi	10 m Ölçüm Mesafesi
30 – 230	30	40
230 – 1000	37	47



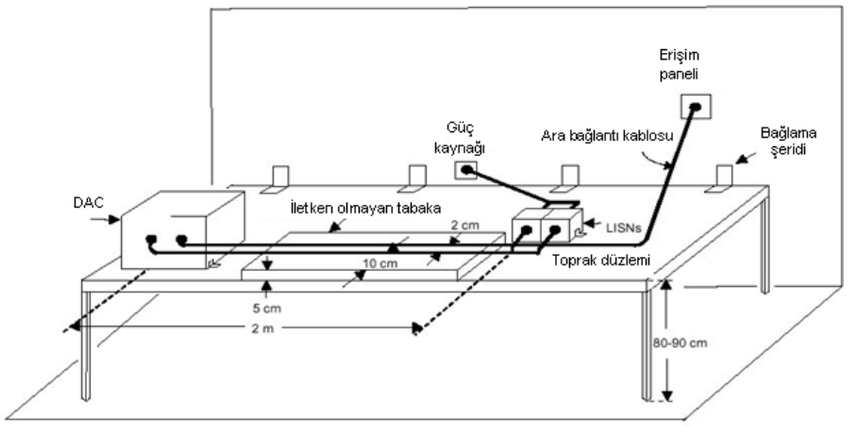
Şekil 305. EN 55022 standardı uyarınca elektrik alan seviyesi ölçümleri



Şekil 306. EN 55022 masa-üstü cihazlar için deney düzeneği



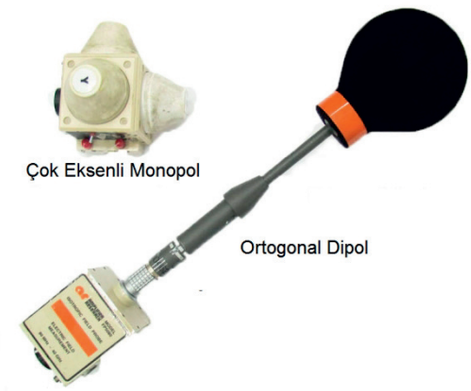
Şekil 307. MIL-STD 461 uyarınca elektrik alan seviyesi ölçümleri



Şekil 308. MIL-STD 461 masa-üstü cihazlar için deney düzeneği

Elektrik Alan Probları ile Elektrik Alan Ölçümü

Elektrik alan probları anten kavramının daha küçük boyutlu şekilleri olarak ortaya çıkar. Elektrik alan probları çevre kirlilik ölçümlerinde [180] ve ayrıca EN 61000-4-3 [181] ve MIL-STD 461 gibi standartların ışınımla bağışıklık deneylerinde verici antenlerden deney altındaki cihaza uygulanan elektrik alanların tespiti için yoğun bir şekilde kullanılır. Elektrik alan probları genel olarak Şekil 309'da görüldüğü gibi çok eksenli monopol (Multi-Axis Monopole) veya ortogonal dipol (orthogonal dipoles) olarak tasarlanmaktadır. Şekil 310'da örnek olarak ortogonal dipol türündeki elektrik alan probunun iç yapısı görülmektedir [182][183][184].



Şekil 309. Çok eksenli monopol ve ortogonal dipol elektrik alan problarının fotoğrafları



Şekil 310. Ortogonal dipol elektrik alan probların iç yapısı

7.5. KÜTLE VE TÜRETİLMİŞ BÜYÜKLÜKLERİN ÖLÇÜMLERİ

7.5.1 KÜTLE

7.5.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Günümüzde hassas kütle ölçümleri birçok alanlar için gereklidir. Kimya, sağlık, çevre, bilimsel çalışmalar ve ticarette kütle ölçümlerinde teraziler kullanılır. Terazilerin kalibrasyonu uluslararası kilogram prototipine izlenebilir olan kütle standartlarıyla gerçekleştirilir. Yüksek hassasiyetli kütle standartları ulusal metroloji enstitülerinde muhafaza edilir. Bu kütle standartlarıyla verifikasyon ofislerinin ve kalibrasyon laboratuvarlarının izlenebilirlik zincirine bağlantısı sağlanır. Yüksek hassasiyet, Planck sabiti veya Avogadro sabiti gibi fiziğin temel sabitlerinin ölçümü içinde gereklidir.

Bir cismin ağırlığını veya kütlesini belirleme işlemi insanoğlunun en eski ölçüm tekniklerinden birisidir. Çünkü ticaretin ve takasın başlamasıyla birlikte bir ürünün fiyatını belirlemek için kütle ölçümüne ihtiyaç duyulmuştur. Ticarette ağırlık kavramı kütleden daha fazla kullanılır. Bir cisim, dünyanın kendi ekseni etrafında dönmesi sebebiyle oluşan merkezkaç kuvvetinin ve yerçekimi alanın etkisindedir. Ağırlık kuvveti cisme etki eden yerel çekim ivmesiyle birlikte o andaki havanın kaldırma kuvvetine de bağlıdır. $F = m\,g\,(1 - \rho_h / \rho)$ (F; ağırlık kuvveti, m; kütle, ρ_h;hava yoğunluğu, ρ; cismin yoğunluğu)

Orta çağlarda kütle “quantitas materia” yani bir cismin madde miktarı olarak tanımlanmıştı. Kütle kavramı latin massa’dan türetilmiştir. Massa, özel bir şekli olmayan homojen bir malzemenin öbekleri anlamındadır. Klasik kütle kavramının temel özellikleri; kütle korunumu, yerçekimi ve eylemsizliktir. Isaac Newton (1643-1727) tarafından kütle fiziksel bir büyüklük olarak tanımlanmadan önce, filozoflar kütleyi madde olarak adlandırıyorlardı. Korunum kanunu, Yunan filozofu Anaxagoras (M.Ö. 428-500) tarafından şu şekilde ifade edilmişti ”Hiçbir şey var olmaz ya da var olan sona ermez”.

Benzer şekilde kütle ile ilgili tanımlar, Democritus (M.Ö. 371-460), Empedocles (M.Ö. 430-490) ve Lucretius (M.Ö. 55-96) tarafından da ileri sürüldü. Miletus Thales (M.Ö. 547-625), Heraclitus (M.Ö. 480-550) ve Empedocles su, ateş, hava veya dünyayı orijinal ölümsüz maddeler olarak kabul etmişlerdi. Democritus ve Leucippus (M.Ö. 450-500) sabit ve sürekli olan bir atomun olduğuna inanmışlardı. Johannes Keppler (1571-1630) direnci maddenin bir özelliği olduğunu açıklamıştı. Isaac Newton, kuvvetin (ağırlık) aksine kütle kavramını geliştirdi ve 10^{-3} doğruluklu bir sarkaçta ölçümler yaparak, ikinci hareket kanunu yani kütle ve kuvvet arasında orantılılığı formülize etti. Burada orantılılık faktörü ivmedir. Lavoisier (1743-1794)’de kütle korunum prensibini yaptığı deneysel çalışmasıyla tekrar vurguladı. John Dalton (1766-1844) kimyasal bağlardaki katlı oranlar bilgisinden kimyada atomistik teoriyi kurdu ve ilk bağıl atomik kütle tablosunu oluşturdu. 1905 yılında Einstein, Maxwell-Hertz elektro dinamik teorisinden çok iyi bilinen rölativistlik teorisini geliştirdi ve kütle ve enerji arasındaki genel orantıyı $E = m\,c^2$ (E; enerji, m; kütle, c; ışık hızı) formülüyle kanıtladı. Klasik fiziğin enerji ve kütle korunum kanunu tek bir kanuna (kütle veya enerji olarak) indirgenmiştir.

Modern Fizik’te Einstein’ın kütle enerji denklemiyle atomik parçalarda gözlenen kütledeki farklılıklar çok iyi açıklanır. 1916 yılında Einstein eylemsizlik (durağan) kütlesi ve pasif gravitasyonel kütle arasında fark olmadığını rölativite teorisiyle ilgili çalışmalarda yayınladı. Frank Wilczek (2005) aldığı Nobel ödülünde ve yayınında “Asymptotic Freedom: From Paradox to Paradim”, “The Origin of Mass” parçacık fiziğinde son gözlemleri dikkate alan modern bir kütle kavramını açıklamıştır.

Ölçme ve ölçme standardı oluşturma çalışmalarının, insanlık tarihi ile beraber yürütüldüğü söylenebilir. Tarihçilerin bu konuda yaptıkları incelemeler, ilk çalışmaların önce Babil’de daha

sonra da Mısır ve Roma'da yapıldığını gösterir. M.Ö. 2500 yıllarına ait Mısır duvarlarında 10^{-2}'den daha iyi olmayan mekanik eş kollu terazi resimleri görülür.

Kütle, metre gibi kolayca ölçülemeyen fiziksel bir büyüklüktür. Kütleyi doğrudan ölçen cihaz yoktur. Ancak dolaylı yollarla, genellikle ölçümlerle veya kuvvetlerin karşılaştırılmasıyla belirlenebilir [185].

Tarihte Kütle Standardının Tanımlanması, Gerçekleştirilmesi ve Geliştirilmesi

Orta çağ döneminde toplumlar arası ilişkilerin artmasıyla birlikte özellikle ağırlık ve uzunluk birimlerini karşılaştıracak, bu konuda birliği sağlayacak bir ölçme sistemine ihtiyaç duyuldu. Bu durum uluslararası kilogram prototipin oluşturulmasına neden oldu.

XVII. yüzyılın ortalarında Fransa'da uzunluk ve ağırlık birimleri konusundaki karmaşayı gidermek için çalışmalar başlatılarak ve 1793 yılında tamamlandı. Referans ağırlık, + 4 °C'de 1 dm^3 suyun ağırlığı olarak kabul edildi. Bu ağırlık tanımı, metrik sistemin temelini oluşturan ilk doğal ve evrensel ifade şeklidir. 1799 yılında ise, ağırlık biriminin daha pratik kullanımını sağlamak amacı ile platinden imal edilen bir referans kütle standardına aktarılması kararlaştırıldı. Bu yeni referans ağırlık standardı, Fransa Cumhuriyeti'nin arşivlerinde korunduğundan ismi "Arşiv Kilogram" olarak adlandırılır.

1869 yılında İtalya da dahil olmak üzere 12 ülke, metrik sistemi resmi olarak kabul etti. Bir çok Avrupa ülkesinin bilim adamları ve mühendisleri resmi olarak onaylamasalar da bu standardı kullandılar, ancak var olan kütle standardı Fransız standardıydı. Uluslararası statüde bir tanımı yoktu ve kolaylıkla elde edilemezdi. Bazı ülkelerin kilogram standartları, CNAM (Conservatoire National des Arts et Metiers) standartları ile üretilmiştir. Bunlar, farklı malzemeden yapılıp farklı kişiler tarafından üretildi. Örneğin, Froment (Paris); 1857'de Avusturya ve 1860'da Prusya'ya, Collot (Paris); 1863'de İsviçre için Platin'den referans ağırlık üretildi. 19. yüzyılda popüler uluslararası sergilerde, miktarları ve değerleri farklı şekilde ifade edilen çok çeşitli yiyecekler ve ürünler sergilendi. Buralarda evrensel ölçüm sistemi ile ilgili problemler yaşandı.

Bu duruma istinaden 1869 yılında bir kaç Fransız üye ve diğer ülkelerin temsilcilerinden oluşan CIM (Commisson Internationale de Metre) kuruldu. Bu komisyonun amacı, uluslararası standartlarda yeni "metre" üretmekti. 1870 yılının Ağustos ayında Paris'te 24 ülke delegesinin katıldığı ilk toplantıda amacının genişletilmesine karar verildi. Görevlerinin sadece yeni metre'yi oluşturmak olmadığını kütle ve ağırlık sistemini gerçekten uluslararası yapmak için bütün olası faaliyetleri gözönüne almak gerektiğine karar verdiler. 8 kişiden oluşan bir araştırma komitesi oluşturularak, uluslararası kilogramı gerçekleştirmek için öneriler üzerinde çalışmalara başlandı. Komite, eski tanımın korunması veya yeni bir tanımın önerilmesi ya da Arşiv Kilogram ile aynı kütleye sahip standart malzemenin seçilmesi konusunda tartışmalar yaptı.

Eğer metre, meridyene dayanan tanımından, kilogram da metre ve su yoğunluğuna dayanan tanımlardan bağımsızlaşırsa ve iki malzeme standardı referans olarak alınırsa Metrik Sistem'in otoritesinin mükemmelliği bozulacaktı. Başka bir deyişle Arşiv metre ve kilogramın dağıtılmış olan kopyalarından dolayı, referansların değiştirilmesinden ortaya çıkan karışıklığın verdiği endişe, Metrik Sistem'in kendi kendisini yıkması için yeterli olacaktı. Komitenin büyük bir çoğunluğu kendilerine Arşiv Kilogram ile aynı kütleye sahip standart malzemeye dayandırılmış uluslararası kilogram imal edilmesini kararlaştırdı. Hangi tip el yapımı malzemenin seçileceği konusu üzerinde duruldu. Komitenin Fransız grubunun üyeleri yeni metre standardı yapılması için aday malzemelerin içeriği üzerinde tartışarak ve Sainte - Claire Deville etkisi altında seçeneklerini metal ve metal alaşımlar olarak sınırladılar. Demir ve gümüş kolayca değiştiğinden, çelik dayanıksız olduğundan, bakır çok yumuşak bir malzeme olduğundan, pirinç ve bronzun genleşme katsayıları platinden çok farklı olduğundan ve de iridyumun da eritme zorluklarından dolayı kullanılmadı. Saf platin çok yumuşak ve kolayca deforme olabileceğinden bunun alaşımları düşünüldü. Sonuç olarak, tanımlanacak kütle standardı uzun süre kararlılığını sağlayabilmesi için korozyona karşı

dirençli, yüksek yoğunluk değerine sahip (hava yoğunluğunun etkilerini sınırlandırmak için), elektriği ileten (statik elektrikten dolayı parasitik kuvvetleri sınırlamak için), düşük manyetik geçirgenlikli (manyetik alandan kaynaklanan parasitik kuvvetleri sınırlamak için), iyi ısı özelliğine ve yeterli sertliğe sahip malzemeden yapılmalıydı. Kütle standardı % 90 platin ve % 10 iridyum alaşımından yapılmıştır.

Ölçme standartları konusunda evrensel birliği sağlamaya yönelik en önemli gelişme 25 Mayıs 1875 yılında Paris'te toplanan "Metre Konvansiyonu" ile sağlandı. Bu konferansta metre ve kilogram'ın tanımları yapılarak, üye ülkelere bu tanımlara uygun olarak imal edilecek ve her ülkenin referans standartlarını oluşturacak olan metre ve kilogram prototiplerinden birer örnek verilmesi karara bağlandı. Ayrıca bu konferansta uluslararası kilogram prototipi % 90 platin - % 10 iridyum alaşımından yapılmış, çapı ve yüksekliği 39 mm olan silindir ağırlık olarak kabul edildi. Kilogram prototipinin silindir biçiminde olmasının temel sebebi, ortamdaki toz ve kimyasal kirlenmelerden kilogram prototipini koruyabilmek içindir ve bunun için yüzey alanının küçük olması gerekir. En iyi geometrik biçimde küredir, fakat kürenin imalatı ve kullanımı oldukça zor olduğundan, küçük yüzey alanlı ve kullanımı kolay en uygun biçimin, çapı ve yüksekliği aynı olan silindir biçimi olması gerektiği kararlaştırılmıştır. Sonuç olarak 1878'de "Johnson, Matthey ve Co" tarafından 3 adet kilogram prototipi üretilmesine karar verildi. Alaşımların saflığı Sainte - Claire Deville ve Stas tarafından kontrol edilerek 1879'da K_I, K_{II} ve K_{III} isimli, yüzeyinde herhangi bir kusur bulunmayan üç silindir teslim edildi. Bunların yoğunlukları güçlü baskı ile belirlenerek çelik içerisinde çekiçleme ile daha da yoğunlaştırıldı. Daha sonra ağırlıklar parlatılarak, terazi üreticileri tarafından ayarlandı. Ayar ve tartım işlemlerinden sonra 1880 yılında K_I, K_{II} ve K_{III} ağırlıkları 1883 yılına kadar Arşiv Kilogram ile karşılaştırıldı ve sonuçta KIII'ün ağırlığı ile Arşiv Kilogram'ın ağırlığının aynı olduğu sonucuna varıldı. 1883 yılında CIPM, KIII'ü uluslararası kilogram prototipi olarak seçti. K_{III} prototipi uluslararası kilogram prototipi olarak adlandırıldı. Fransa'da Paris yakınlarındaki Sevres'de Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nda (BIPM) muhafaza edilmesi komisyonca kararlaştırıldı.

Fransız hükümeti "Johnson, Matthey and Co"ya ulusal prototiplerin oluşturulması amacı ile 30 adet metre ve 40 adet kilogram prototipi yapmaları için sipariş verdi. Bu kilogram prototipler zaman içerisinde uluslararası prototiple karşılaştırılarak üye ülkelere dağıtıldı. 25 Mayıs 1875 tarihinde Paris'te düzenlenen konferansta, konferansa katılan ve üye olan ülkelere imal edilecek metre ve kütle prototiplerinden birer adet verilmesi kararlaştırıldı. Ayrıca konferans tarihine kadar Fransız Hükümeti tarafından desteklenen bu çalışmaların devamını sağlamaya yönelik olarak üye ülkelerin nüfus ve o dönemdeki siyasi gücüne göre yıllık ödeme yapması da karara bağlandı. Metre Konvansiyonu'nun kurucu devletleri arasında yer alan Osmanlı İmparatorluğu, bu konferansta Kuleli Harp Okulu öğretmenlerinden, Paris Ateşe Militeri Miralay Hüsnü Bey tarafından temsil edildi. Konvansiyon gereği olan ilk yıllık ödeme yapılarak (27.132 Fransız Frangı), Amerika, Almanya ve Fransa'dan sonra yatırılan en yüksek rakamdır.

Ancak 1875 yılı sonrası Balkanlarda başlayan savaşlar ve Osmanlı-Rus savaşı nedeniyle yıllık üyelik ödemeleri yapılmamış, BIPM'in genel kurul üyesi olan Miralay Hüsnü Bey de kurul toplantılarına katılamamıştır. Dönemin BIPM Müdürü G. Ibanes ve Genel Sekreteri A. Hırsch tarafından Osmanlı Devleti Paris Büyük Elçiliği'ne yıllık ödemelerin yapılması ve genel kurul toplantılarına Miralay Hüsnü Bey'in katılması için çeşitli tarihlerde yazılan yazışmalar arşivlerde yer almaktadır. 1881 yılı sonunda Osmanlı Devleti'nin toplam borcu 32.649 Fransız Frangı'na ulaşmıştı.

BIPM, 27 Şubat 1883 tarihli yazısında Miralay Hüsnü Bey'in, genel kurul toplantılarına katılmadığı için istifa etmiş sayılacağı ve yıllık ödemelerin yapılmamasından dolayı imal edilen ilk 30 prototip arasında yer alan ve Türkiye'ye verilmesi gereken ulusal metre ve kilogram prototiplerinin

verilemeyeceğini belirtti. Bunun üzerine, Osmanlı Devleti 1883 yılında Metre Konvansiyonu'ndan çekildiğini BIPM'e bildirdi. Diğer taraftan Osmanlı Devleti'nden bağımsızlığını kazanan bazı ülkelere kilogram prototipleri verildi. Örneğin 1891 yılında 2 numaralı prototip Romanya'ya, 1889 yılında 11 numaralı prototip Sırbistan'a verildi.

Ülkemizde, Cumhuriyet dönemindeki Metre Konvansiyonu ile ilgili en önemli gelişme, 26 Mart 1931 tarihinde 1782 sayılı Ağırlıklar ve Ölçüler Kanunu'nun kabul edilerek metrik sistemin kullanılmasının zorunlu hale getirilmesidir. Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti, 3 Mart 1933 yılında Metre Konvansiyonu'na üye olmak için Paris Büyükelçiliği aracılığı ile BIPM'e başvuruda bulundu. 1 Haziran 1933 tarihinde, BIPM'in Müdürü, ünlü bilim adamı Cd. Ed. Guillaume Türkiye'nin talebini memnuniyetle karşıladıklarını bildirerek; ülke nüfusu oranına (1933 yılında ülke nüfusu = 13.660.000) bağlı olarak en az 3.132 altın-Frank en fazla 18.792 altın-Frank yıllık ödeme ile üye olunabileceğini Türk Hükümetine bildirdi. BIPM aynı mektupla Türkiye'ye, Pt-Ir alaşımından daha ucuz olan, Baros ya da Monel'den yapılacak bir kilogram prototipinin verilmesini önerdi. Söz konusu teklif Türk Hükümeti tarafından kabul edilmeyerek, Türkiye için ulusal kilogram prototipinin Pt-Ir alaşımından imal edilmesini bildirildi. Türkiye'nin bu talebi üzerine 42 numaralı prototip imal edilerek 1935 yılında Türkiye'ye verildi. Söz konusu ulusal kütle prototipi, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'nca, Türkiye İş Bankası Ulus Şubesinde kiralanan kasada 1953 yılına kadar muhafaza edildi. 1953 yılında başlatılmış olan II. Uluslararası Kütle prototiplerinin karşılaştırma ölçümlerine gönderilen 42 numaralı prototipin değiştirilmesi için Türk Hükümetine teklif götürüldü ve teklifin kabul edilmesi üzerine söz konusu prototipin yerine yine 54 numaralı prototip imal edilerek Türkiye'ye teslim edildi. Bu prototipin yoğunluk ölçümleri ve alaşım kimyasal analizleri Johnson- Matthey tarafından yapıldı [186].

Türkiye'nin 54 nolu ulusal kilogram prototipin kütlesi, BIPM'in NBS -2 terazisi ile Mayıs 1989 ve Ekim 1992 tarihleri arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda;

1 kg + 0,203 mg (23 Şubat 1991)

olarak bulundu. Prototipin kütle değerine atfedilen bileşik belirsizlik (u_c) 0,0023 mg'dır ve 0 °C'de 54 nolu prototipin hacmi 46,3916 cm^3 olarak belirlenmiştir [187].

Kütle Birim Kilogramın Tanımı ve İzlenebilirlik

Kütle birimi kilogram dışındaki diğer birimler temel sabitlere dayandırılarak tanımlanmakta, kilogram birimi ise henüz daha fiziksel bir sabit ile ifade edilmemektedir. Doğada hatası ve belirsizliği sıfır olan tek büyüklüktür. Kütle birimi kilogram, Sevres'de BIPM'de muhafaza edilen Uluslararası Kilogram Prototipin kütlesi olarak 1889 yılında yapılan I. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM) kabul edildi ve 1901 yılında yapılan III. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda tanımlandı.

Kütle birimi kilogramdır ve uluslararası kilogram prototipin kütlesine eşittir. Kütle birimi kilogram; yoğunluğu 21500 kg/m^3 olan % 90 Platin - % 10 İridyum alaşımından yapılmış, 39 mm çapında ve 39 mm yüksekliğinde bir silindirdir [188].



Şekil 311. Uluslararası kilogram prototipi ve 6 yasal kopyası



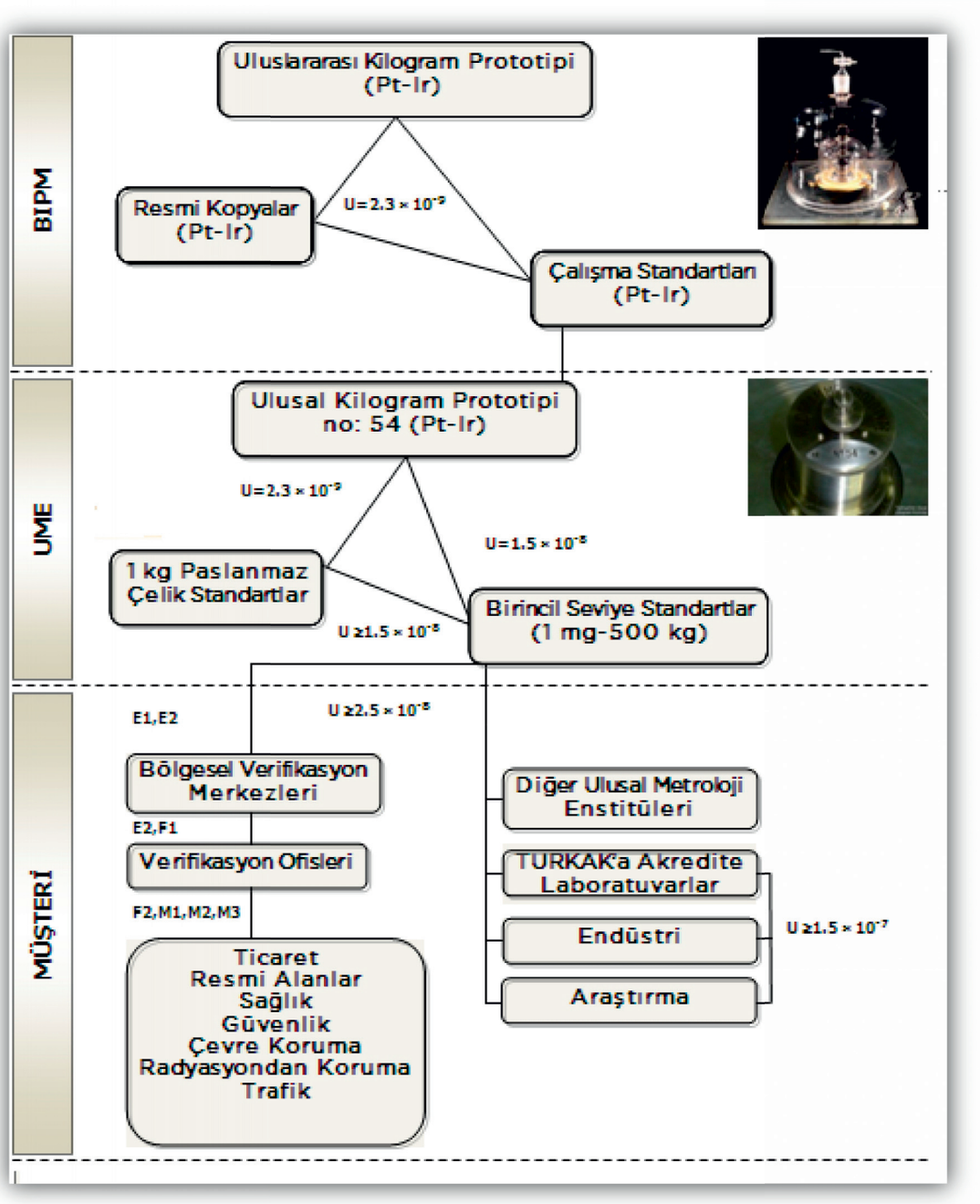
Şekil 312. Uluslararası kilogram prototipi

Şekil 311 ve Şekil 312'de görüldüğü gibi kütle birimi kilogramın gerçekleştirilmesi ve iletimin yüksek doğrulukla sağlanmasında, uluslararası kilogram prototipi (IKP) ve onun altı kopyası (KI, 7, 8(41), 32, 43, 47) özenle muhafaza edilir. Ayrıca BIPM'in 9, 31 ve 25 nolu çalışma standartları mevcut olup, 9 ve 31 nolu çalışma standartları ulusal kilogram prototiplerin kütle karşılaştırılmalarında kullanılır. Her 5 yılda bir 25 nolu çalışma standardıyla karşılaştırılır.

Tablo 20. Kütle birimi dönüşüm tablosu

Nicelik	Birimin Adı	Birimin Sembolü	SI Birimlerindeki Değeri
Kütle	kilogram	kg	g (gram), 1 g = 10^{-3} kg t (ton), 1 t = 10^{3} kg kt (kiloton), 1 kt = 10^{6} kg mg (milligram), 1 mg= 10^{-6} kg μg (mikrogram), 1 μg = 10^{-9} kg ng (nanogram), 1 ng = 10^{-12} kg SI sistemine dahil olmayan fakat ticarette kullanılan birimler; 1 carat = 200 mg=2×10^{-4} kg 1 grain= 64,79891 mg 1 pound (lb) = 16 ounces (oz) =7000 grain = 453,59237 g 1 troy pound (lb tr) = 12 troy ounces (oz tr) = 5760 grain=373,24172 g

Kütle birimi kilogram ile diğer temel birimler arasındaki temel fark; kilogram biriminin gerçekleştirilmesi ve tanımlanmasında el yapımı bir nesneye bağlı kalınmasıdır. Mümkün olan en yüksek hassasiyetle kütle biriminin iletimini kontrol altına alabilmek için kütle standartları hiyerarşi zinciri oluşturulmuştur. Şekil 313'de görüldüğü gibi kütle standartları izlenebilirlik zinciri BIPM'de bulunan uluslararası kilogram prototipi, onun altı kopyası ve çalışma standardıyla başlar ve ulusal kilogram prototiplerinden, metroloji enstitülerinin referans standartlarına ve kullanıcıya doğru devam eder.



Şekil 313. Kütle standartları izlenebilirlik zinciri

7.5.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Bir kütle standardı, kütle değeri ve belirsizliğiyle karakterize edilir. Belirlenen kalibrasyon aralığı süresince kütle değişiminin küçük olması malzemenin özelliklerine (mekaniksel dayanıklılık, elektriksel ve manyetik özellikler, korozyona karşı direnci vb.), yüzey kalitesine, muhafaza koşullarına ve kullanımına bağlıdır. Ağırlıklar; şekil, boyut, malzeme, yüzey kalitesi, maksimum izin verilebilir hata payları gibi fiziksel ve metrolojik karakteristiklere, uluslararası tavsiyelere ve de ulusal talimatlara göre imal edilir. Yasal metrolojide kütle yerine konvansiyonel kütle tanımlanmıştır. Konvansiyonel kütle, belirlenen koşullar altında hava ortamındaki tartım sonucunun konvansiyonel değeridir. 20 °C sıcaklıkta bulunan bir ağırlığın konvansiyonel kütlesi, 1,2 kg m^{-3} hava yoğunluğunda ağırlığı dengede tutan ve yoğunluğu 8000 kg m^{-3} olan referans bir ağırlığın kütlesidir.

Bu tanıma göre, yoğunluğu ρ olan bir ağırlığın konvansiyonel kütlesi m_k aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır. Burada ρ_0 ; 1,2 kg m^{-3}, ρ_K ; 8000 kg m^{-3}

$$m_K = m\frac{1-\rho_O/\rho}{1-\rho_O/\rho_K} \tag{191}$$

$$m_K = m\frac{\rho - 1{,}2\ \mathrm{kg\,m^3}}{0{,}99985\,\rho} \tag{192}$$

Bir ağırlığın konvansiyonel kütlesi, ağırlığın kütlesi (m) ve yoğunluğunun (ρ) bir fonksiyonudur. Paslanmaz çelikten yapılan bir ağırlığın konvansiyonel kütlesi, ağırlığın yoğunluk değeri (ρ) konvansiyonel yoğunluk değerine (ρ_K) yakın olduğundan çok küçük bir miktar kadar kütlesinden sapar. Diğer malzemeler için bağıl sapma değerleri; Silikon için $-3{,}6\times10^{-4}$ (malzeme yoğunluğu: 2329 kg m^{-3}) ve platin için de $9{,}4\times10^{-5}$ (malzeme yoğunluğu: 21.450 kg m^{-3})'dür. Bir tartım cihazının gösterge değeri, ağırlığın konvansiyonel kütle değerine göre ayarlanır. Standard koşullar altında ($\rho_h=\rho_0$) tartımlar yapıldığında, cihazın göstergesi konvansiyonel kütle değerini gösterir.

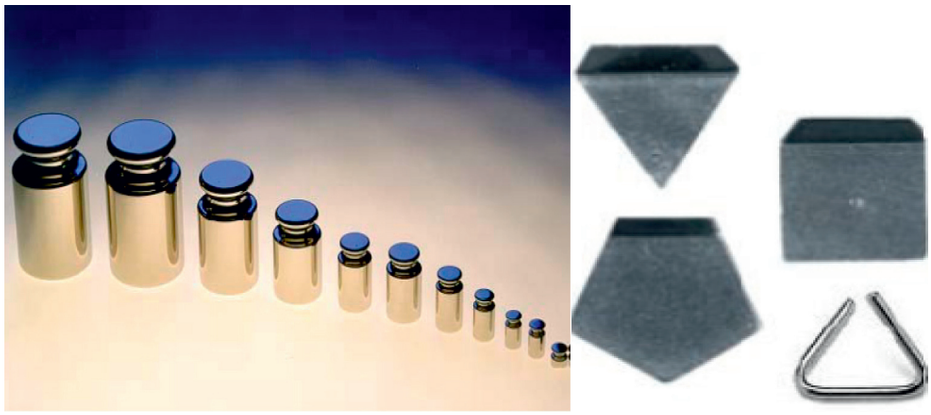
Yasal metroloji (OIML), hiyerarşik bir yapı içinde 1 mg – 5000 kg aralığında en yüksek doğruluktan, en düşük doğruluğa kadar kütle biriminin iletilebilmesi için ağırlıkların doğruluk sınıflarını tanımlar. Bu tanımlamaya göre ağırlık sınıfları E1, E2, F1, F2, M1, M2 ve M3'tür. Bu doğruluk sınıfları, maksimum müsaade edilen hata sınırları ve belirsizliklere göre belirlenir. Maksimum müsaade edilen hata, ağırlığın nominal kütlesi ve ölçülen konvansiyonel kütlesi arasında izin verilen farkın maksimum mutlak değeridir. Maksimum müsaade edilen hata $\sqrt{10}$ faktörü ile derecelendirilir. Her bir doğruluk sınıfı için konvansiyonel kütlenin bileşik standart belirsizliği u_c, maksimum müsaade edilen hata sınırlarının 1/6 eşit veya küçük olmalıdır (Tablo 21).

Bu belirsizlikte ihtiyacı karşılayabilmek için kalibre edilecek olan test ağırlık kendi doğruluk sınıfından, bir üst seviyede olan bir referans ağırlıkla karşılaştırılır. Örneğin E2 sınıfı bir test ağırlığının kalibrasyon işleminde E1 sınıfı referans standardı kullanılır. Bir ağırlığın doğruluk sınıfına göre bir ölçümün doğruluğunu ve tutarlılığını sağlamak için ağırlıklar için gerekli olan fiziksel ve metrolojik özellikleri bilmek gerekir. Örneğin, ağırlıklar köşeleri sivri olmayan basit geometrik şekle sahip olmalıdır. Yüzeyde kirlenmeye bağlı bir tortu tabakası oluşumundan kaçınmak için yüzeyin pürüzsüz olması gerekir. OIML R 111'e göre ağırlıkların maksimum yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 22'de verilmiştir. 50 kg'dan büyük olan ağırlıklar için bu değerler iki katı kadardır. Yüksek kararlılık, taşıma kolaylılığı ve hacim ve yüzey alanı arasındaki ilişkiden dolayı 1 g'dan 20 kg'a kadar yüksek doğruluklu kütle standartları ve ağırlıklar silindir

biçimindedir ve ağırlıkların yüksekliği genellikle çapın 3/4 ile 5/4'ü arasındadır. Nominal değeri 1 g'dan küçük olan ağırlıklar tel veya levha şeklindedir (Şekil 314).

Tablo 21. OIML R 111'e göre doğruluk sınıfları için bağıl standard belirsizlikler ($U_c/M_k \leq Mpe/6$) ve bağıl maksimum müsaade edilen hatalar (mpe/m_K)

Doğruluk Sınıfı	Bağıl Maksimum Müsaade Edilen Hata mpe/m_K	Bağıl Standard Belirsizlik u_c/m_K
E_1	$5{,}0\times10^{-7}$	$\leq 8{,}3\times10^{-8}$
E_2	$1{,}6\times10^{-6}$	$\leq 2{,}7\times10^{-7}$
F_1	$5{,}0\times10^{-6}$	$\leq 8{,}3\times10^{-7}$
F_2	$1{,}6\times10^{-6}$	$\leq 2{,}7\times10^{-6}$
M_1	$5{,}0\times10^{-5}$	$\leq 8{,}3\times10^{-6}$
M_{1-2}	$1{,}0\times10^{-4}$	$\leq 1{,}7\times10^{-5}$
M_2	$1{,}6\times10^{-4}$	$\leq 2{,}7\times10^{-5}$
M_{2-3}	$3{,}2\times10^{-4}$	$\leq 5{,}3\times10^{-5}$
M_3	$5{,}0\times10^{-4}$	$\leq 8{,}3\times10^{-5}$



Şekil 314. Silindir biçiminde kütle standartları ve mg ağırlıklar

Tablo 22. OIML R 111'e göre ağırlıklar için müsaade edilen yüzey pürüzlülüğünün maksimum yüksekliği ve ortalama değerleri ($m_k \leq 50$ kg)

Doğruluk Sınıfı	E_1	E_2	F_1	F_2
R_z (µm)	0,5	1	2	5
R_a (µm)	0,1	0,2	0,4	1

Ağırlıklar, atmosferdeki su buharı, karbondioksit, oksijen ve ozon gibi aktif maddelerin sebep olduğu korozyona karşı dayanıklı malzemelerden yapılmalıdır [189]. Kütledeki değişimler Tablo 23'de doğruluk sınıfına atfedilen maksimum müsaade edilen hata sınırları içerisinde olmalıdır.

Modern tartım cihazlarının elektromanyetik kuvvet kompansazyon sistemi ve ağırlıklar arasında manyetik kuvvetler oluşur. Bu durum ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Manyetik kuvvetin dikey bileşeni, ağırlığın manyetik alınganlığına ve sürekli magnetizasyonuna bağlıdır. Kütle belirlemelerinde bu kuvvetin etkisi ihmal edilebilir. Çünkü manyetik yoğunluk değeri $B_z \leq 110$ μT, $|\partial B_z / \partial z| \leq 34$ μT. Ağırlığın manyetik alınganlığı ve sürekli magnetizasyonu Tablo 23 ve Tablo 24'de verilen değerleri geçmemelidir. Bu koşullar altında manyetik kuvvetin ölçüm sonucuna etkisi ölçülen ağırlığın maksimum hata sınırlarının % 10'dan küçüktür.

Tablo 23. OIML R 111'e göre ağırlıklar için verilen manyetik alınganlık değerleri

Doğruluk Sınıfı	E_1	E_2	F_1	F_2
m ≤ 1 g	0,25	0,9	10	-
2 g ≤ m ≤ 10 g	0,06	0,18	0,7	4
20 g ≤ m	0,02	0,07	0,2	0,8

Tablo 24. OIML R 111'e göre ağırlıklar için verilen sürekli manyetik polarizasyon değerleri

Doğruluk Sınıfı	E_1	E_2	F_1	F_2	M_1	M_{1-2}	M_2	M_{2-3}	M_3
Maksimum polarizasyon	2,5	8	25	80	250	500	800	1600	2500

Ağırlıkların manyetik özelliklerini doğrulamak için uygulanacak metotlar OIML R111'de tanımlanır. Pratikte, birincil seviye kütle standartlarının gerçekleştirilmesinde yoğunluğu 8000 kg m^{-3} olan östenetik çelik malzeme kullanılır. Silikon, birincil seviye yoğunluk standardının oluşturulmasında ve Avogadro sabitinin belirlenmesinde ve çoğunlukla nikel tabanlı süper alaşımlar da referans standartların gerçekleştirilmesinde kullanılır [190].

Tartım Cihazları

Bilinmeyen bir kütlenin ağırlık kuvveti, aşağıda verilen terazilerin fiziksel prensiplerine göre karşılanır.

i. Terazi içerisinde inşa edilmiş olan ağırlıklar ile veya sabitleştirilmiş karşı ağırlıklarla ve dışarıdan etki eden karşı bir kuvvetle, test objesinin ağırlık kuvvetinin kısmen karşılanması, Örneğin;
   - Elektromanyetik kuvvet kompansazyonu ilkesine göre çalışan, içerisinde karşı ağırlıklar inşaa edilmiş olan elektromekanik teraziler,
   - Elektromanyetik kuvvet kompansazyonu ilkesine göre ağırlık kuvvetini kısmen kompanse eden, dahili karşı ağırlıkları bulunan elektronik komparatörler.

ii. Dışarıdan etki eden karşı bir kuvvetle (ağırlık kuvveti değil), test objesinin ağırlık kuvvetinin tümüyle kompanse edilmesi. Örneğin;

- İndüktans, kapasitans yük hücreleri,
- Minimum yüklemeden, maksimum yüklemeye kadar ki ölçüm aralığını ihtiva eden, tümüyle elektromanyetik kuvvet kompansazyonu ilkesine göre çalışan elektronik analitik teraziler.

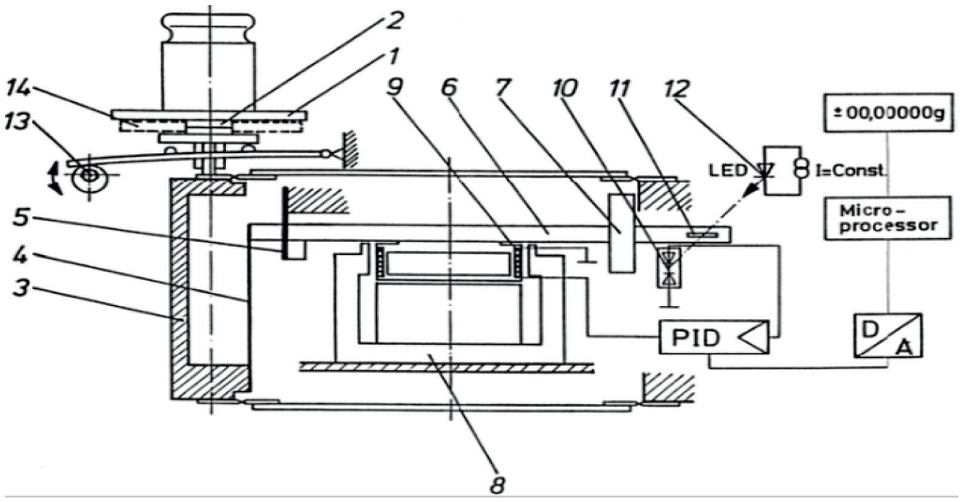
Yüksek Doğruluklu Kütle Komparatörleri

Yüksek doğruluklu kütle karşılaştırmaları, yüksek doğruluklu kütle komparatörleriyle (çözünürlük/maksimum kapasite) geçekleştirilir. Kütle komparatörünün elektriksel tartım aralığı maksimum yükün % 1 ve % 0,1 içerisindedir ve terazilerde fark tartımları(yerine geçirme yöntemi) uygulanır. Belirli değerlerde ölçüm yaptıklarından, bu terazilere "komparatör teraziler" veya "kütle komparatörleri" denir. Fakat yüksek çözünürlüklü ticari analitik teraziler de sürekli bir elektriksel tartım aralığına sahiptir. Yüksek çözünürlüklü kütle komparatörleri elektromanyetik kuvvet kompanzasyonlu terazilerdir. Çoğunlukla bu teraziler otomatik ağırlık değiştirme mekanizmalıdır. Kütle ölçümleri kişiden bağımsız tam otomatik gerçekleştirilir. Uluslararası kilogram prototipi ile başlayan kütle birimi izlenebilirlik zincirinin en üst noktasındaki laboratuvarlarda kullanılır (Şekil 315). Örneğin; BIPM, ulusal metroloji enstitüleri gibi.



Şekil 315. BIPM ve UME'de kullanılan Mettler HK1000MC ve UME-One Prototip Teraziler

Modern yüksek çözünürlüklü (çözünürlüğün maksimum kapasiteye oranı $< 10^{-7}$) analitik ve komparatör teraziler elektromanyetik kuvvet kompansazyonu ilkesine göre çalışır. Şekil 316'da üsten yüklemeli elektronik komparatör terazinin tasarımı gösterilmektedir.

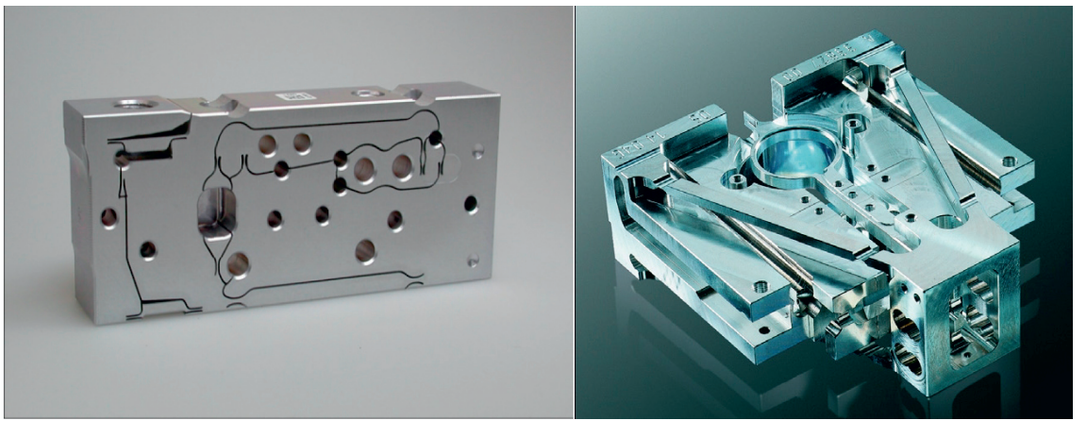


Şekil 316. Elektromanyetik kuvvet kompansazyonlu komparatör terazinin şematik diyagramı

Yük ileticisi (3) ve tartım kefesinin kendi kendisini merkezlemesi için, yük taşıyıcısının iki paralel kılavuzun desteği ile dikey pozisyonda kalması gerekir. Bağlantı elementi (4) ve esnek yataklar (5) üzerinden ağırlık kuvveti kaldıraca iletilir. Kaldıraç kolunun arkasında, kaldıraç kolunun pozisyonu kontrol eden bir pozisyon sensörü vardır. Ağırlık kuvvetinin bir kısmını mekaniksel olarak kompanse edebilmek için uzun kaldıraç kolunda, karşı ağırlık bulunur. Hatta bazı komparatör terazilerde, farklı nominal değerli bir kaç karşı ağırlık da bulunabilir. Ağırlık kuvvetinin artakalan etkisi ise, sürekli bir mıknatıs (8) ortamında bulunan bobin (9) tarafından karşılanır. Bobin manyetik alan içerisinde ağırlık kuvvetine karşı bir kuvvet oluşturur. Bobin akımı, yüke bağlı olarak optik pozisyon sensörü (10^{-12}) ile kontrol edilir. Öyle ki, uzun kaldıraç kolundaki yarık (11) tanımlanmış pozisyonda kalır. Böylece iki kuvvet dengelenmiş olur. Bir çevirici vasıtası ile kuvvet dijital sinyale dönüşür [185].

Sinyal işlemi, oluşan gerilim sinyallerinin bir kısmını içerir, diğer tüm gürültü sinyallerini keser. Mikro işlemcisinde sinyaller kütle birimi cinsinden terazinin göstergesinden okunur.

Günümüzde modern elektromanyetik kuvvet kompansazyonlu monoblok tartım hücreleri, bilgisayar destekli çizim (CAD) ve bilgisayar simülasyonu (FEM) yardımıyla ve çeşitli üretim teknolojileriyle örneğin, frezeleme, kesme ve tel erozyon gibi özel alaşımlardan veya alüminyum kalıp dökümden üretilir. Tartım hücresinin bir bütün olması montaj ve ayarlama işleminde oldukça kolaylık sağlar (Şekil 317).



Şekil 317. Monoblok tartım hücresi (Mettler-Toledo AG ve Sartorius AG)

Kütle Ölçüm Yöntemleri

Doğruluklu kütle belirlemeleri aynı nominal değerin fark tartımlarına göre yapılır. Burada, tartımlarda uygulanan iki fark tartım yönteminden bahsedilir.

Yerdeğiştirme (Gaussian) Yöntemi

Bu yöntem, sadece eş kollu terazilerde kullanılır. Referans standart R ve test ağırlığı T, en az bir kez olmak üzere yük taşıyıcısı üzerinde yerleri değiştirilerek tartılır ve bu iki tartım sonucunun ortalaması alınır.

Yerine Geçirme Yöntemi

Bu yöntem tüm tartım cihazlarında kullanılır. Referans standardı R ve test ağırlığı T, sırasıyla aynı yük taşıyıcısı üzerinde birkaç kez tartılır. Eş kollu terazilerde ise, bu yöntemin yapılabilmesi için ikinci yük taşıyıcısına yardımcı bir ağırlık (dara ağırlığı) konulur. Kütle komparatörleri bu yönteme göre çalışır ve otomatik olarak kısa sürede ardı ardına birkaç kez ölçüm yapılarak ölçümün doğruluğu artırılır.

Kütle belirlemelerinde bağıl ölçüm belirsizliği 1×10^{-5} den daha küçük olması amaçlanıyorsa, her iki ölçüm yöntemi için etki parametreleri belirlenerek belirsizlik bütçesine dahil edilmelidir. Ölçüme etki eden parametreler;

- Ölçümde kullanılan terazinin linearitesi ve ayarı,
- Havanın kaldırma kuvveti düzeltmesi,
- Isı etkileri,
- Manyetik ve elektriksel girişim,
- Referans standart ağırlığın ve test ağırlığının hacim (veya yoğunluk) belirsizlikleri.

Ayrıca $\leq 1\times10^{-7}$'den daha küçük bir belirsizlikle kütle belirleyebilmek için kütle skalasının gerçekleştirilmesi gerekir.

Kütle karşılaştırmalarında kullanılan terazilerde, gerçekte kuvvetler karşılaştırılır. Hava ortamında yapılan kütle karşılaştırmalarında havanın kaldırma kuvvetine dikkat edilmelidir [186]. m_R kütleli ve ρ_R yoğunluklu referans standardı, m_T kütleli ve ρ_T yoğunluklu test ağırlık yerine geçirme yöntemine karşılaştırıldığında;

$$m_{WR} = m_R \frac{(1-\rho_h/\rho_R)}{(1-\rho_o/\rho_k)} \cdot \frac{(1-\rho_o/\rho_j)}{(1-\rho_{aj}/\rho_j)} \tag{193}$$

$$m_{WT} = m_T \frac{(1-\rho_h/\rho_R)}{(1-\rho_o/\rho_k)} \cdot \frac{(1-\rho_o/\rho_j)}{(1-\rho_{aj}/\rho_j)} \tag{194}$$

Bu eşitliklerden, hava ortamında yapılan kütle belirlemeleri için tartım denklemi elde edilir.

$$m_T(1-\rho_h/\rho_T) = m_R(1-\rho_h/\rho_R) + \Delta m_W'' \tag{195}$$

yada;

$$m_T = m_R(1+B) + \Delta m_W'' \tag{196}$$

B : Havanın kaldırma kuvveti düzeltmesi, $B = \dfrac{\rho_h(\rho_T-\rho_R)}{\rho_T\rho_R}$

$\Delta m_W''$: Düzeltilmiş tartım farkı

Terazilerin ayarlanmasında $\rho_{hj}=\rho_o$ olduğu kabul edilir. Buna göre;

$$\Delta m_W'' = \Delta m_W(1-\rho_o/\rho_k) = 0{,}99985\ \Delta m_W \tag{197}$$

Bu eşitlikten gidilerek, $\Delta m_W < 3000d$ tartım farkları için $\Delta m_W'' = \Delta m_W$ yaklaşımı yapılır;

Bu kütle tartım denklemini referans standardın ve test ağırlığın hacimleri cinsinden düzenlersek;

$$m_T = m_R + \rho_h(V_T - V_R) + \Delta m_W'' \tag{198}$$

m_T, m_R : test ağırlığın ve referans standardının kütlesi, [kg]

ρ_h : hava yoğunluğu, [kg/m^3]

V_T, V_R : test ağırlığın ve referans standardının hacimleri, [m^3]

Δm_W" : tartım cihazının düzeltilmiş gösterge farkı, [kg]

m_T test ağırlığın kütlesinin belirsizliği, aşağıda verilen standart belirsizliklere [23][24] göre hesaplanır.

- referans standardın kütlesi, m_R
- referans standardın kayma belirsizliği
- havanın kaldırma kuvveti düzeltmesi
- tartım farkı
- terazi hassasiyeti

1×10^{-7} eşit veya daha küçük bir belirsizlikle bir ağırlık setinin kalibrasyonu gerektiğinde, alt bölmelendirme / üst bölmelendirme (subdivision / multiplication method) tartım dizaynına göre ağırlık setinin düzenine ve ihtiyaca bağlı olarak tartım şemaları oluşturulur ve bu tartım şemalarına göre kütle ölçümleri yapılır (Şekil 318). Oluşturulan tartım denklemlerinden bilinmeyen kütlelerin değerleri en küçük kareler yöntemiyle (least squares) hesaplanır.

a. Şema A. 1 kg birincil seviye standartları ve ulusal kilogram prototip

No	Pr	1kg1	1kg2
1	+	-	
2	+		-
3		+	-

b.Şema B. 1 kg – 100 g

No	1kg1	1kg2	500g1	500g2	200g1	200g2	100g1	100g2
1	+	-						
2	+		-	-				
3		+	-	-				
4			+	-				
5			+		-	-	-	
6				+	-	-		-
7					+	-		
8					+		-	-
9						+	-	-
10							+	-

Şekil 318. a) Referans standardı Ulusal Kilogram Prototip olan, 8 adet bilinmeyen kütle standartlı tartım şemaları b) Her bir şemada 3 ve 10 adet tartım denklemi içeren 1 kg - 100 g arası kadar kütle skalası örneği

7.5.2 KUVVET

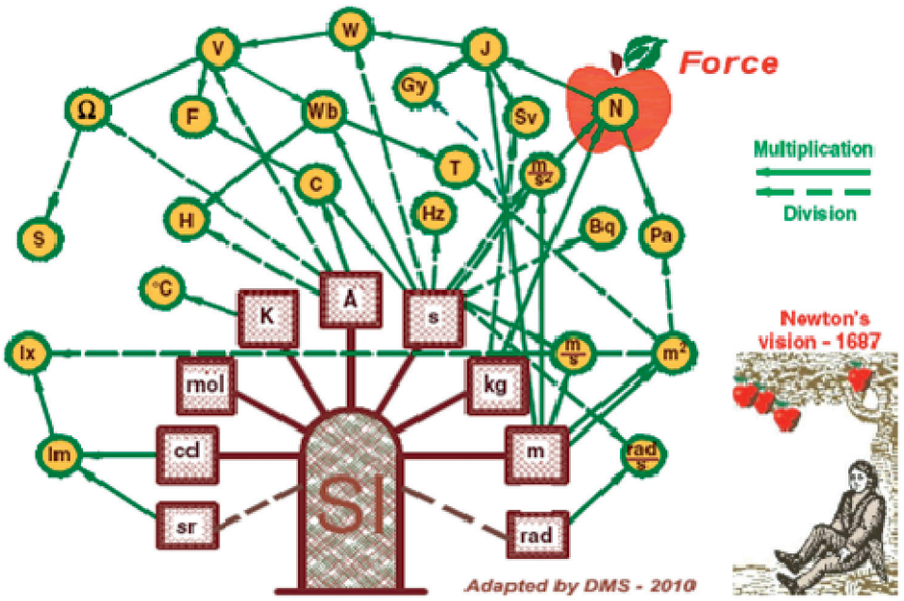
7.5.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Kuvvet, etkilediği kütleyi ivmelendiren bir büyüklük olarak tanımlanır ve bu ad altında kullanılan yük ve ağırlık ile aynı fiziksel birime sahiptir. Newton'un ikinci kanununa göre kuvvet, bir cismin kütlesi [m] ile o cisme etkiyen kuvvetin yarattığı ivmenin [$\vec{a}$] çarpımı olarak Eşitlik (199) ile ifade edilmektedir.

$$\vec{F} = m\,\vec{a} \qquad (199)$$

Newton, 1 kg'lık kütleye 1 m/s^2'lik ivme kazandırmak için gereken birim kuvvettir ve sembolü [N]'dir. Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) kuvvet birimi olarak Newton kullanılmaktadır. İlk kez 1946 yılında tanımlanmış ve 1948 yılında newton olarak kullanılmaya başlanmıştır [191].

Dünya genelinde de yaygın olarak kullanılan Newton, MKS birim sisteminde de temel bir büyüklük olarak yer alır. Yukarıdaki ifade de açıkça görüldüğü gibi Newton, Uluslararası Birimler Sistemi'nde (SI) türetilmiş bir ölçüm birimidir. Kuvvet birimi olarak Newton'dan başka kilogramkuvvet (kgf), librekuvvet (lbf) gibi kuvvet büyüklükleri de kullanılır.



Şekil 319. SI-Birimler ağacında kuvvet birimi Newton'un yeri [193]

SI sisteminden önce kuvvet birimi olarak kilopond [kp] veya kilogramkuvvet [kgf] kullanılmaktaydı. 1 kgf, standard yerçekimi ivmesinin vakum ortamında 1 kg'lık kütle üzerinde oluşturduğu etki olarak tanımlanmıştır.

1 kgf = 1 kp = 9,80665 N

Benzer şekilde ABD'de kuvvet için bir başka birim olan librekuvvet [lbf] kullanılmaktadır. Libre kuvvet'in newtona dönüşüm bağıntısı aşağıda verilmiştir.

1 N = 0,22481 lbf

1 lbf = 4,448198 N = 4,4482 N

Tablo 25'de yaygın olarak kullanılan diğer birim sistemlerindeki kuvvet birimleri ve birbirlerine dönüşüm katsayıları verilmiştir. Burada dikkati çeken bir nokta da, kgf'un MKS-Birimler Sisteminde temel birim olduğudur [192][193].

Tablo 25. Çeşitli birim sistemlerinde temel birimlerle kuvvet birimi arasındaki ilişki

	SI Birimler Sistemi	CGS Birimler Sistemi	MKS Birimler Sistemi
Uzunluk	m	cm	m
Kütle	kg	g	- -
Zaman	s	s	s
Kuvvet	kg m/s^2 (Newton)	g cm/s^2 (dyne)	kgf (kilogramkuvvet)
Dönüşüm Oranı	9,80665 N	9,80665·10^5 dyn	1 kgf

Herhangi bir ortamda, yerçekimi ivmesinin bir kütle üzerindeki etkisinin büyüklüğü ise Arşimed etkisi gözönünde bulundurularak Eşitlik (200) ile belirlenir:

$$F = K \times m \times g_{yerel} \times (1 - \frac{\rho_{hava}}{\rho_{kütle}}) \qquad (200)$$

K : Oran katsayısı

m : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin kütlesi

g_{yerel} : Yerel yerçekimi ivmesi

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu

V : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin hacmi

ρ_{hava} : V hacmine sahip kütle üzerinde ρ_{hava} yoğunluğuna sahip havanın kaldırma etkisi

$\rho_{kütle}$: Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin yoğunluğu

Eşitlik (200)'de belirtilmiş olan K katsayısının, kullanılan birimlerle ilişkisi Tablo 26'da verilmiştir.

Tablo 26. Newton'un İkinci Kanununda için K-sabiti

W	m	g_s veya g_{yerel}	K
N	kg	m/s^2	1
Dyn	g	cm/s^2	1
Poundal	lb	feet/s^2	1
Lbf	lb	feet/s^2	1 / 32,17405
Lbf	lb	cm/s^2	1 / 980,665
Kgf	kg	m/s^2	1 / 9,80665

Havanın yoğunluğunun belirlenmesinde ampirik Eşitlik (201) kullanılabilir:

$$\rho_{hava} = \frac{0{,}348444\ P - (0{,}00252\ T - 0{,}02052)\ H}{273{,}15 + T} \quad (201)$$

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu [kg/m^3]

P : Atmosferik basınç [hPa], [mbar]

H : Bağıl atmosferik nem [%]

T : Ortam sıcaklığı [°C]

Yerçekimi ivmesinin yerel değeri temel olarak dünya üzerindeki koordinatlar ve yükseklik ile değişir. Bundan başka mevsimler ve ayın konumu ile de küçük değişiklikler gözlenir. Standart yerçekimi ivmesi deniz seviyesi ve 45° enlemdeki değere karşılık gelmekte olup; değeri Eşitlik (202) ile verilmiştir :

$$g_{standart} = 9{,}80665\ m/s^2 \quad (202)$$

Herhangi bir enlemdeki "g" yerel yerçekimi ivmesi [m/s^2] Eşitlik (203) ile belirlenebilir :

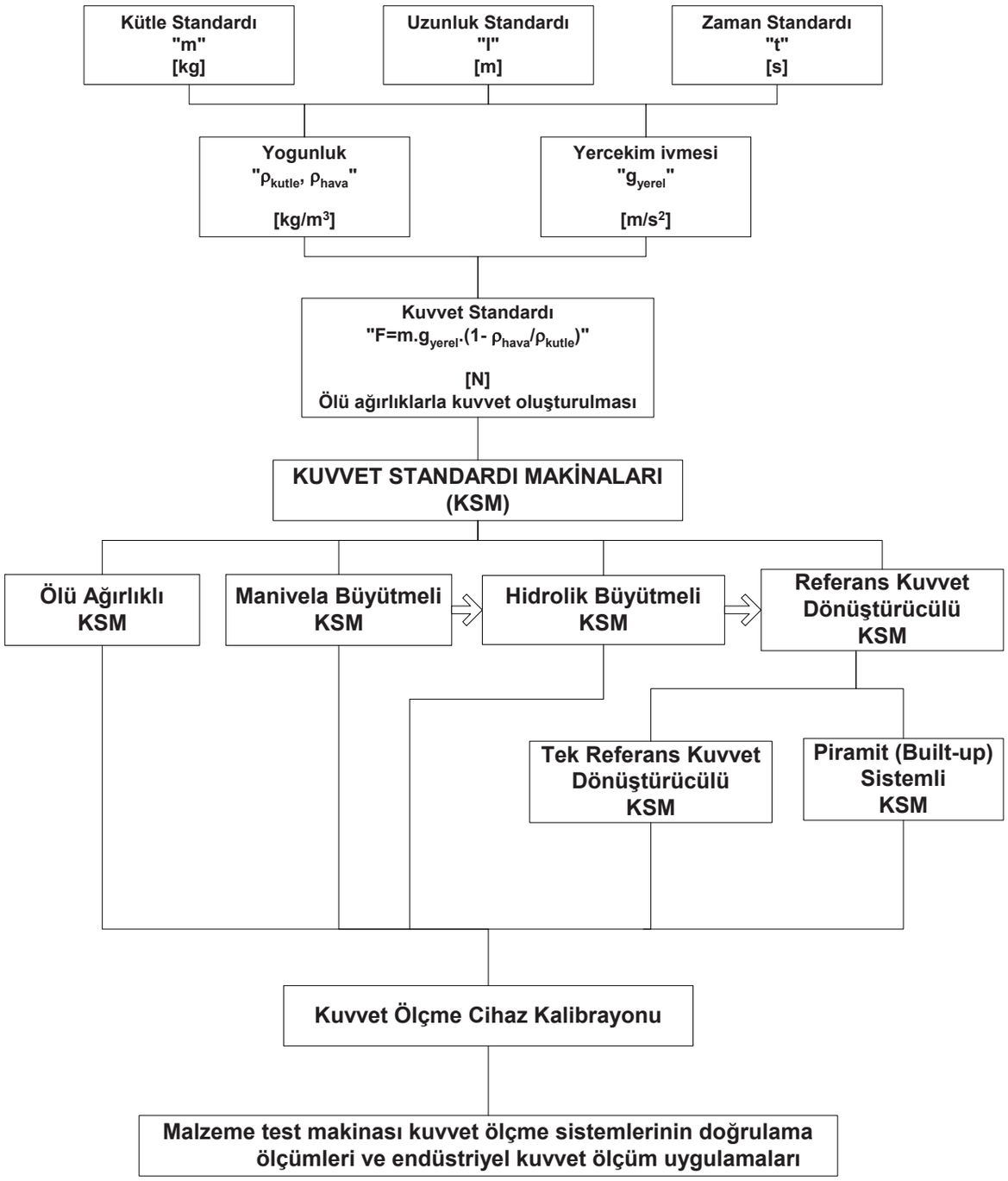
$$g_{yerel} = 9{,}78049\ (1+0{,}0052884\ Sin^2\phi - 0{,}0000059\ Sin^2\ 2\phi) \quad (203)$$

O enlemdeki yerçekimi ivmesi için ise rakım [m] düzeltmesi [m/s^2] Eşitlik (204) kullanılarak yapılabilir:

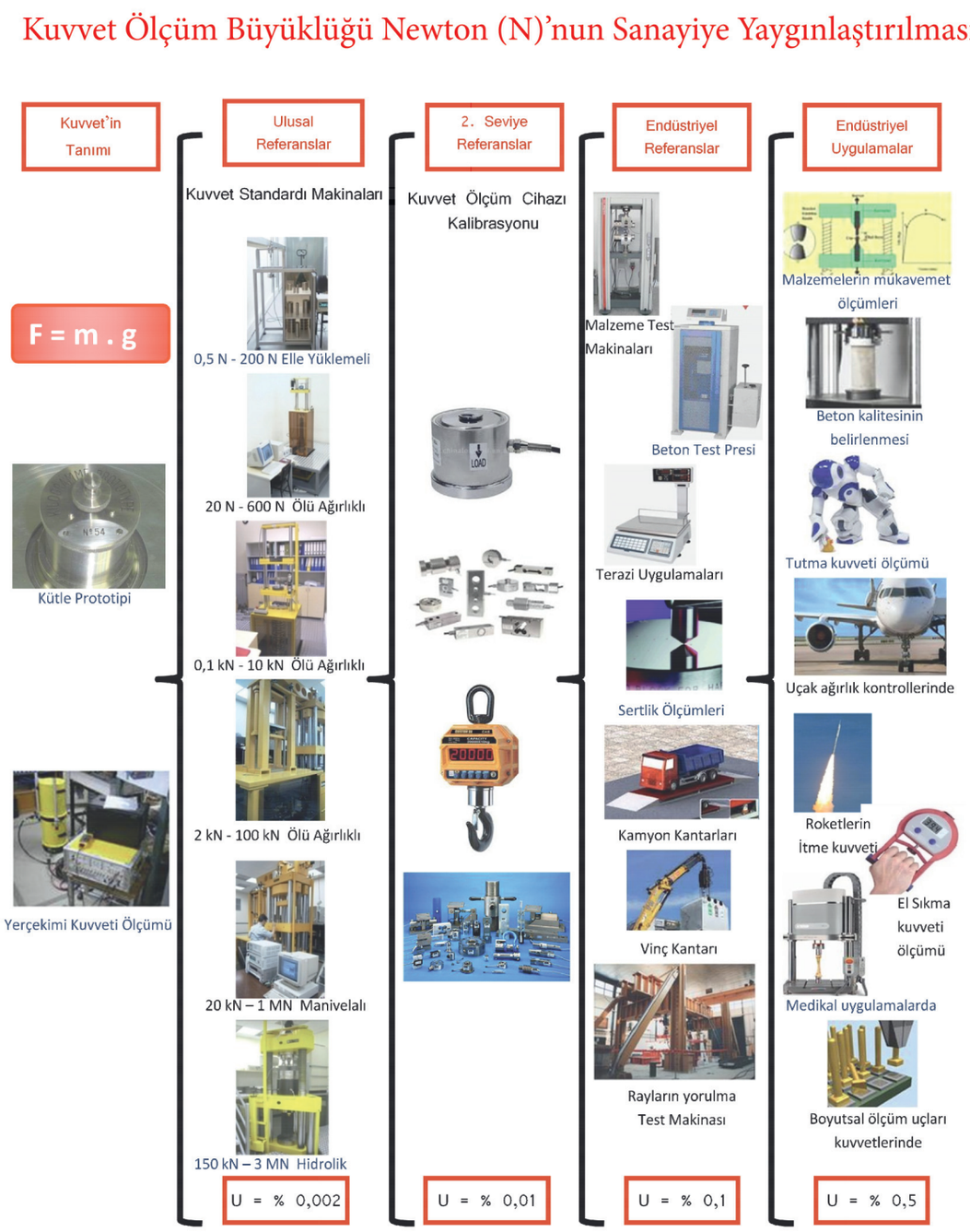
$$Düzeltme = -(0{,}00030855 + 0{,}00000022 \cdot Cos2\varphi\ h + 0{,}000072 \left(\frac{h}{1000}\right)^2 \quad (204)$$

Kuvvetin Dağıtımı

Kuvvet skalasının ülkemizdeki izlenebilirik zinciri Şekil 320'de verilmiştir. Ayrıca uluslararası Birimler Sistemine (SI) göre kuvvet birimi olarak kabul edilen Newton [N]'un sanayiye yaygınlaştırılması ise Şekil 321'de gösterilmiştir [194][195].



Şekil 320. Kuvvet skalasında izlenebilirlik



Şekil 321. Kuvvet ölçüm büyüklüğü Newton (N)'un sanayiye yaygınlaştırılması

7.5.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Kuvvet Ölçme Yöntemleri

Bilinen Yük İle Dengeleme:

Ölçülecek kuvvet belirli kütlelere sahip bir karşı ağırlık tarafından dengelenir ve

Kuvvet = Karşı Ağırlığın Kütlesi x Yerçekimi İvmesi ($F = m \times g$)

olarak hesaplanır. Pratik zorluğuna karşın, bu metod yüksek doğruluk verir. Kuvvet (yük) ölçümünden çok kuvvet ortamlarından geçen kütlelerin ölçülmesinde sıklıkla kullanılır.

Esnek Gövde Üzerinde Kuvvet ile Oluşturulan Deformasyondan Yararlanma:

Bu metod göreceli olarak doğruluk verir ve hemen hemen bütün kuvvet dönüştürücülerinde kullanılır. Özellikle yüksek doğruluk elde edilmek istendiğinde, iyi kalitede esnek bir gövde seçilmek zorunludur.

Yapılan tasarıma göre uygun ölçme metotlarının (strain gage, indüktif, kapasitif, vs) seçilmesiyle, istenen deformasyon miktarları ölçülebilir.

Uygulanan Kuvvet Etkisiyle Fiziksel Özelliklerin Değişiminden Yararlanma :

Bu metod uygulanan kuvvete karşılık malzemelerin manyetik veya elektriksel özelliklerinin değişiminden yararlanır. Fiziksel özelliklerdeki lineer olmayan değişimlerden dolayı, uygulama alanı yaygın değildir. Fakat bilimsel yönden ilgi çekicidir ve bu özelliklerin uygulandığı bazı ölçme alanları mevcuttur.

2 ve 3. yöntemlerde belirtilen prensiplerle yapılan mekaniksel kuvvet ölçme cihazlarına dinamometre adı verilir.

Kuvvet Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz ve Standartlar

Kuvvet Standardı Makineleri:

Kuvvet biriminin pratik olarak gerçekleştirilmesinde kütleler üzerindeki yer çekimi etkisi prensip olarak kullanılır. En küçük belirsizlik değerine de ancak bu prensibi kullanan sistemlere ölü ağırlıklı kuvvet standardı makineleri ile ulaşılır. 10 N'dan 4,4 MN'a kadar değişen çeşitli tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı makineleri mevcuttur. Bunların belirsizlik değerleri 1×10^{-5} ile 1×10^{-4} arasında değişir. Fakat büyük kapasiteli sistemler inşa edildiğinde ortaya çıkan hacimsel ve konstrüktif zorluklardan dolayı büyük kuvvet değerleri mekanik (manivelalı) veya hidrolik ara sistem ve mekanizmalar aracılığı ile oluşturulur. Kapasiteleri manivelalar için 2 MN'a kadar hidrolik olanlar ise 16,5 MN'a kadar çıkabilir. Bunların belirsizlik değerleri ise 1×10^{-4} ile 5×10^{-4} arasında değişebilir [191][196]. Burada kullanılan ara mekanizmaların beraberinde taşıdıkları hatalar ve diğer harici etkilerden dolayı sistemin toplam belirsizliği, doğrudan kütlelerin kullanıldığı sistemlerin sahip olduğu belirsizlik değerinden daha büyüktür. Gerek maliyet gerekse kapasite probleminin çok belirgin olduğu durumlarda yüksek vasıflı bir kuvvet ölçme cihazının referans olarak kullanıldığı ve kuvvetin genellikle hidrolik bir sistemle oluşturulduğu sistemler kullanılır. Özellikle nispeten daha büyük belirsizlik değerlerinin kabul edilebildiği uygulamalar için çok uygun bir çözüm olan bu sistemler için dünyada 100 kN ile 30 MN arasında değişen kapasitelere sahip çok sayıda makine mevcuttur. Bunların belirsizlik değerleri 1×10^{-4} ile 5×10^{-3} arasında değişmektedir[196]. TÜBİTAK UME'nin kuvvet standardı makineleri Şekil 322 ve Şekil 323'de verilmiştir.



Şekil 322. UME 110/1100 kN ölü ağırlıklı manivela büyütmeli kuvvet standardı makinesi

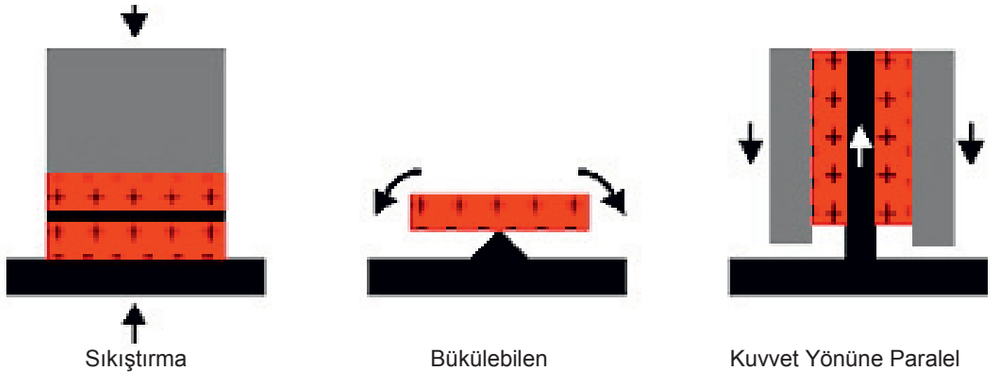


Şekil 323. UME 11 kN kuvvet standardı makinesi

Kuvvet Ölçme Cihazları:

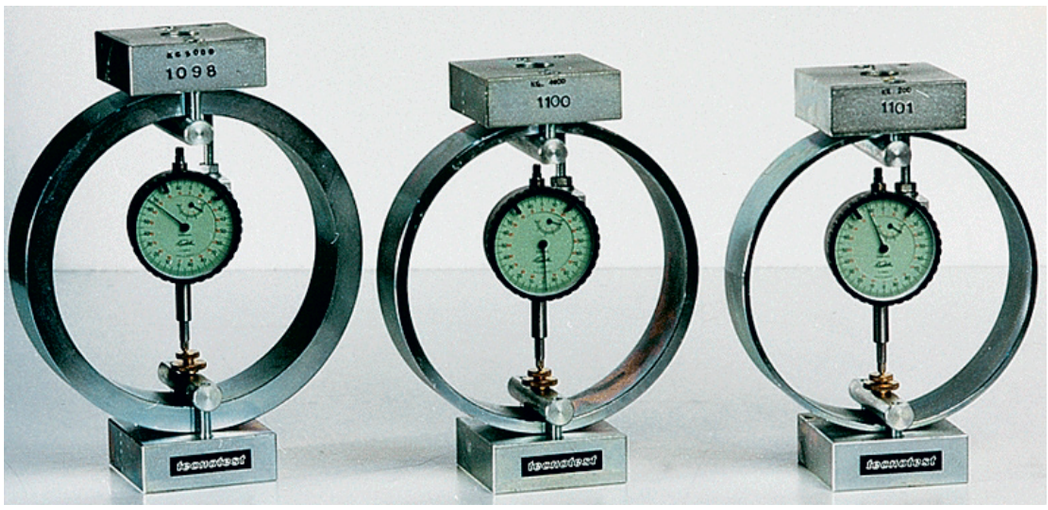
Kuvvet ölçüm büyüklüğünün türetilmiş bir büyüklük olmasından veya bir başka ifade ile doğrudan kendisinin değil onunla bağlantılı diğer büyüklüklerin ölçülebilmesinden dolayı insanoğlu, kuvvet ölçümünde bugüne kadar çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bunlar kaba bir gruplama ile bilinen bir yük ile dengeleme, esnek bir gövde üzerinde kuvvetin etkisiyle oluşan şekil değişiminden faydalanma ve malzemelerin kuvvet etkisiyle bir takım fiziksel özelliklerini değiştirmeleridir [197][198].

Esnek bir gövde üzerinde oluşan deformasyon ya doğrudan boyut değişiminin ölçüldüğü ya da açısal veya hacimsel değişimlerin gözlendiği sistemler olarak ortaya çıkmışlardır. Malzemelerin kuvvet altında doğal elektrik frekansını değiştirmesi, manyetik vektörünün değişimi, piezo elektrik sistemlerde olduğu gibi elektrik ile yüklenmesi gibi bir takım fiziksel özelliklerini değiştirmesi yine kuvvet ölçümünde kullanılan prensiplerdir (Şekil 324).



Şekil 324. Piezoelektrik malzemelerin kullanım şekilleri

Elektriksel tip kuvvet ölçme cihazlarının geliştirilmesinden önce en yaygın olarak kullanılan kuvvet ölçme cihazları, “Ölçme Halkaları” idi. Bugün halen sanayinin çeşitli alanlarında, özellikle malzeme test makinelerinin kurum içi gerçekleştirilen periyodik doğruluk kontrollerinde kullanılır. Daire veya elips formu verilmiş olan ölçme halkaları, uygulanan yükün etkisi ile kuvvetin uygulandığı yönde bir boyutsal değişime uğrarlar (Şekil 325)[199].



Şekil 325. Ölçme halkası

Elastik deformasyondan yararlanma yöntemleri gelişen teknoloji ile birlikte deformasyonu elektriksel yöntemlerle ölçen sistemlere doğru geçişler yaşandı. Bunun en önemli sebebi elektriksel ölçümlerde görülen büyük gelişmeler ve teknolojinin otomasyondan bağımsız düşünülmesinin doğal sonucu olarak her geçen gün elektriksel sistemlere doğru bir yönelme olmuştur. Bu sistemler mekanik ağırlıklı sistemlere oranla daha küçük ve kullanımı daha kolay olacak şekilde tasarlanmış olduklarından dolayı daha ucuz, hafif ve kullanılması pratiktir.

Elektriksel yöntemleri kullanan kuvvet ölçme cihazları kapasitif tipte, manyeto elektrik tipte, piezoelektrik tipte, indüktif tipte ve uzama ölçerli (strain gage) tipte olmak üzere 5 gruba ayrılmalarına karşın günümüzde en yaygın olan ve kullanımı geniş alan bulmuş olan uzama ölçerli (strain gage) tipte olanlar hakkında kısa bilgiler yer verilecektir.

Direnç uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüleri bugün en yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme cihazları olup, mekanik deformasyonun elektriksel çıktıya dönüştürülmesinde uzama ölçerler (strain gages) kullanıldığından bu ismi aldılar. Dirençli uzama ölçerler elastik sınırlar içinde deformasyon gösterecek olan çelikten imal edilmiş olan kiriş veya halka tipi elemanlara sıcak veya soğuk olarak yapıştırılırlar .

Uygulanan yüke bağlı olarak oluşan birim şekil değişimi, uzama ölçerler tarafından hissedilerek bir direnç değişimi üretilir. Direnç değişimi, besleme gerilimi, uzama ölçerin k-faktörü ve malzemenin elastiklik modülü gibi veriler değerlendirilerek uygulanan yüke karşılık gelen gösterge değeri elde edilir.

Bu tip cihazlardan yüksek doğruluklu sonuçlar elde edebilmek için dijital bir voltmetre veya potansiyometre ile beraber yüksek kararlılığa sahip bir DC güç kaynağına ihtiyaç vardır. Genellikle sıcaklık, nem, korozyon gibi harici etkilere karşı yalıtılmış olduklarından uzun süreli olarak kullanılabilirler. Şekil 326’da farklı tip strain gageli kuvvet ölçme cihazları görülmektedir[200].



Şekil 326. Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları

Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu

Kuvvet ölçme cihazlarının en yüksek doğrulukla kullanım alanı bulduğu yaygın nokta "Tek Eksenli Test Makineleri"nin kalibrasyonudur. Bir diğer yaygın kullanım noktası ise sertlik ölçme cihazlarının kuvvet ölçme kısımlarının kalibrasyonudur. Bu amaçla Avrupa Birliği ve Gümrük Birliği kavramlarının oluşmasından önce ülkeler kendi belirledikleri yöntemlerle kalibrasyon yaparlarken; globalleşen dünyada ölçmenin mutlak gerekliliğinin yanında en temel şart olan ölçümlerin mukayese edilebilirliği koşulunu sağlamak amacıyla "ISO-International Standard Organisation" olarak tüm dillerde ifade edilen standartlar geliştirildi. Bu kapsamda tek eksenli test makinelerinin statik olarak doğruluklarının kontrolü için kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunu düzenleyen EN ISO 376 standardına göre kalibrasyon gerçekleştirilmektedir [201][195][194]. Amerika'da ise kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda ASTM E74 standardı kullanılmaktadır [202].

Bu standartta tarif olarak kalibrasyonun, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin yükü taşıyan elemana uygulanması ve kuvvet ölçme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen gösterge veya sehim-ölçme sisteminde verilerin kaydedilmesinden ibaret olduğu belirtilmiştir.

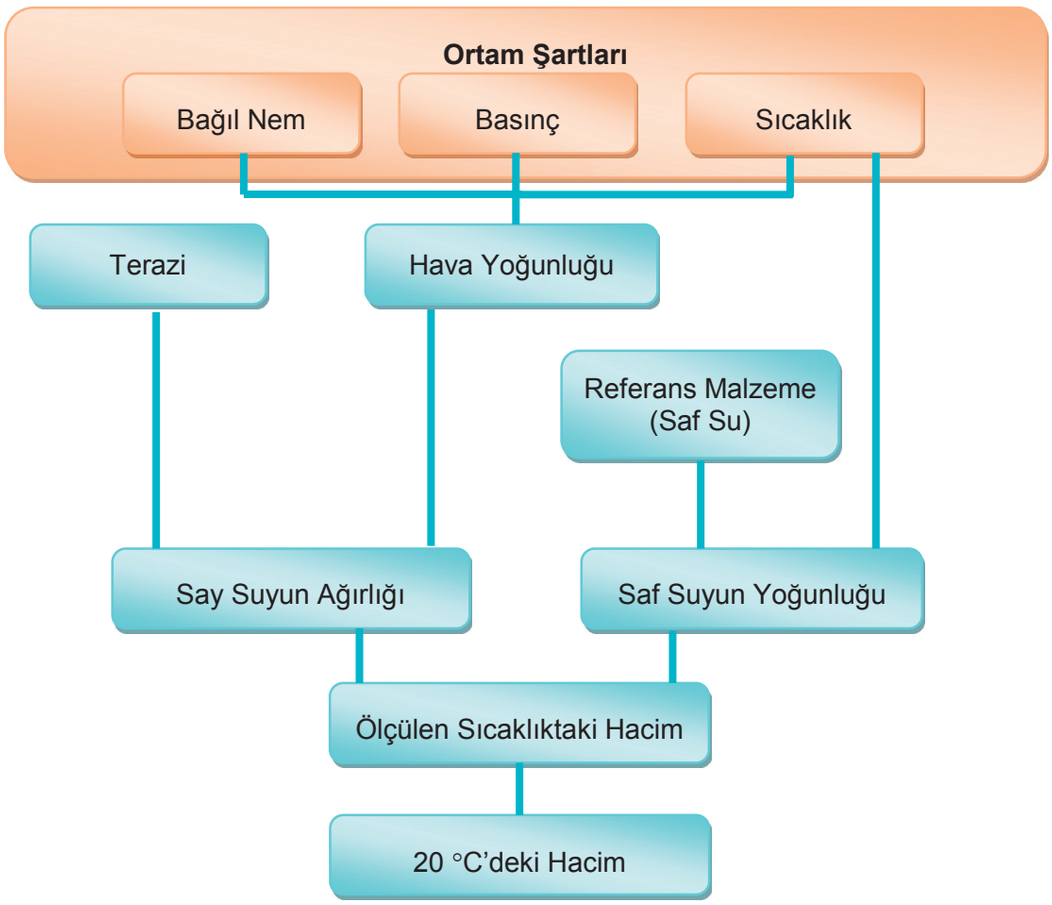
7.5.3 HACİM ve YOĞUNLUK

7.5.3.1 Hacim SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Doğada, maddenin katı, sıvı ve gaz fazlarında olduğu bilinir. Bilimsel araştırmalarda ve teknolojik uygulamalarda kullanılan malzemelerin hacim ve yoğunluk bilgileri kritik önem taşır. Dolayısıyla, hacim ve yoğunluk değerlerinin doğru olarak ölçülmesi ve ölçümler için kullanılan referansların, uygun izlenebilirlik zincirleriyle muhafaza edilmesi oldukça önemlidir.

Katıların hacimlerini belirlemek için iki yaklaşım vardır. İlki, hacmi çevreleyen boyutların ölçülerek geometrik hesaplamalarla hacmin bulunması, ikincisi ise Arşimet ilkesini kullanarak hacmin belirlenmesidir. Şayet hacmi bulunacak nesne düzgün bir şekle sahipse (küre, dikdörtgenler prizması vb.) hacim belirleme işleminde, boyutsal ölçüm yaklaşımı uygun olabilir. Ancak düzgün bir şekle sahip olmayan katılar için, genelde Arşimet ilkesinin kullanılması zorunludur [203].

- Hacim bir SI birimi değildir, ancak Uluslararası Birimler Sistemi'yle kullanımı kabul edilmiş bir birimdir.
- "1 kg saf suyun hacmi 1 L olarak tanımlanmıştır." (3. CGPM 1901)
- 1901'de yapılan tanım yürürlükten kaldırılmış, yerine "1 L'nin 1 desimetre küpe eşit olduğu kabulü yapılmıştır." (12. CGPM 1964)
- Hacim biriminin, "l" veya "L" şeklinde gösterilebileceği kararlaştırılmıştır. (16. CGPM, 1979)



Şekil 327. Hacim biriminin izlenebilirlik zinciri

Tablo 27. Hacim birimi dönüşüm tablosu

Büyüklük	Birimin Adı	Birimin Sembolü	SI Birimlerindeki Değeri
Hacim	Litre	L, ℓ	1 L = 1 ℓ = 1 dm^3 = 10^3 cm^3 = 10^{-3} m^3

7.5.3.2 Yoğunluk SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Yoğunluk, Uluslararası Birimler Sistemi'nde (SI) türetilmiş bir birim olup, bir maddenin kütlesinin hacmine oranı olarak tanımlanır.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{205}$$

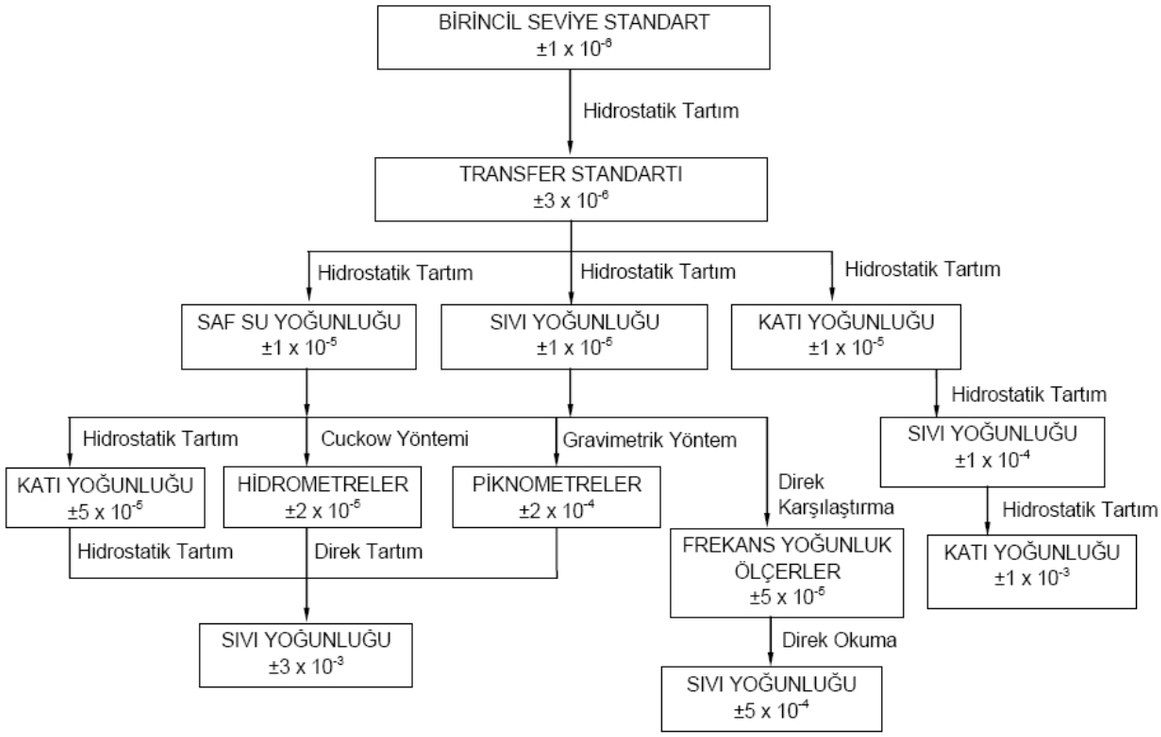
Yoğunluk için kullanılan SI birimi kg/m^3'tür. Ancak kütle birimi g, mg veya µg, hacimde dm^3, cm^3 veya mm^3 ve ℓ = Litre, mℓ, µℓ alınarak g/cm^3 = g/mℓ = 10^3 kg/m^3 veya g/dm^3 = mg/cm^3 = kg/m^3 gibi yoğunluk birimleri de kullanılır [203].

İlgili SI Birimleri:

Kütle : Ulusal kilogram prototipi [kg]

Hacim : Uzunluktan türetilmiş [m^3]

Yoğunluk : Kütle/Hacim [kg/m^3]



Şekil 328. Yoğunluk biriminin izlenebilirlik zinciri

Tablo 28. Yoğunluk birimi dönüşüm tablosu

Büyüklük	Birimin Adı	Birim Sembolü	SI Birimlerindeki Değeri
Yoğunluk	Birim hacmin kütlesi	ρ	1 kg/m^3 = 10^{-3} g/cm^3 = 10^{-3} g/mℓ

TÜBİTAK UME'de izlenebilirlik 1 kg kütlesinde tek kristalli silikon küre kullanılarak gerçekleştirilir.



Şekil 329. TÜBİTAK UME referans yoğunluk standardı

Yoğunluk değerinin, sıcaklık parametresi ile arasındaki ilişki çok önemlidir. Belli bir sıcaklıkta ölçülen yoğunluk değerinin başka bir sıcaklıktaki değere teorik olarak dönüştürülebilmesi mümkündür. Genel olarak yoğunluk değeri, t = 20 °C'de (uluslararası sıcaklık skalası ITS 90'a göre) verilir. Yoğunluk değeri, farklı bir referans sıcaklık derecesinde tayin ediliyorsa;

$$\rho(t) = \frac{m}{V(t)} \tag{206}$$

$$\rho(t_0) = \frac{m}{V(t_0)} \tag{207}$$

Hacim genleşme katsayısı değeri, (α_v) alınarak ve aşağıdaki formüller kullanılarak yoğunluk değeri farklı bir referans sıcaklık derecesinde belirlenir. Çelikten veya pirinçten yapılmış ağırlıklar için ortalama hacim genişleme katsayısı $\alpha_v = 5\times10^{-5}$ °C^{-1}'dir. Sıvıların hacim genişleme katsayısı katılara göre çok daha büyüktür. Bu nedenle, her hidrostatik tartım yöntemi ile yoğunluk belirleme ölçümünde sıcaklık ölçümü oldukça önemlidir.

$$\rho(t_0) = \rho(t) \times \left[1 + \alpha_V \times (t - t_0)\right] \tag{208}$$

7.5.3.3 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Geometrik Olarak Hacim/Yoğunluk Belirlemesi

Homojen bir cismin yoğunluğu (bu cisim küre, küp veya prizma olabilir) o cismin boyutlarından gidilerek hacminin bulunmasıyla hesaplanabilir. Örneğin; kenar uzunluğu 60 mm olan ve 0,1 mm toleransla imal edilmiş küpün geometrik ölçüm sonucu V hacmi bulunabiliyorsa, m kütlesi havada yapılan tartımla (tartım esnasında ρ_{Hava} ölçülmeli) belirlenir. Bu durumda, Eşitlik (209) geçerli olur [204].

$$W \times g - \rho_{Hava} \times V_{TeraziyeAitKütle} \times g = m \times g - \rho_{Hava} \times V \times g \qquad (209)$$

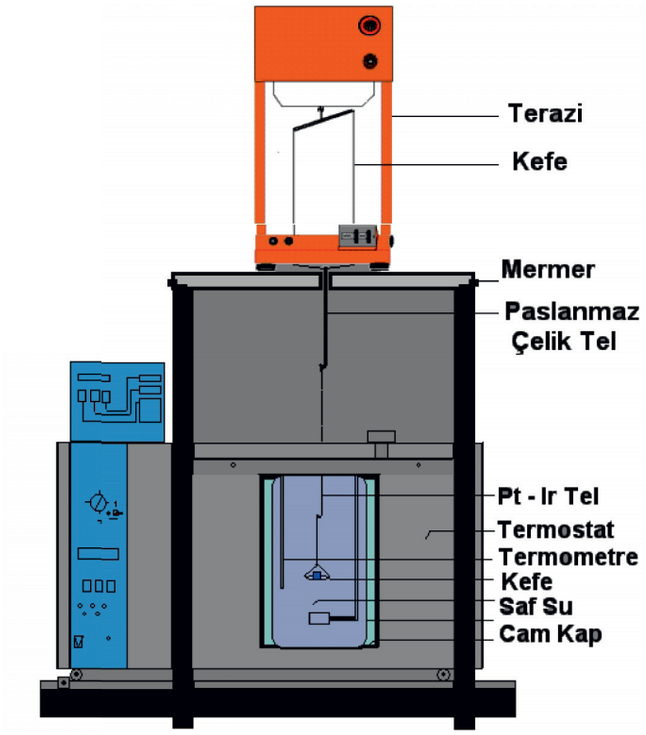
W tartım değerini, g yerçekimi ivmesini, $V_{Teraziye\ Ait\ Kütle}$ teraziye ait kütlenin hacmini ifade eder. Eşitlik (209)'da "m" yalnız bırakılırsa;

$$m = W \times \left(1 - \frac{\rho_{Hava}}{\rho_{Teraziye\ Ait\ Kütle}}\right) + \rho_{Hava} \times V \qquad (210)$$

Günümüzde kullanılan terazilere ait kütleler paslanmaz çelikten yapılır ve yoğunlukları ($\rho_{Teraziye\ Ait\ Kütle}$) 8000 kg/m^3 alınır ($\rho_{Hava}$=1,2 kg/m^3). Eşitlik (206), (207) ve (208) kullanılarak kütlenin yoğunluğu bulunur.

Arşimet İlkesine Göre Hacim/Yoğunluk Belirlemesi

Arşimet ilkesine göre; sıvı ile dolu olan bir kaba daldırılan cisim, sıvı içinde kalan hacmiyle orantılı bir kaldırma kuvvetine maruz kalır. Başka bir deyişle tam olarak sıvıyla dolu olan bir kaba, katı bir cisim daldırdığımız zaman taşan sıvıyı tartarsak elde ettiğimiz tartım değeri sıvının daldırılmış cisme uyguladığı kaldırma kuvvetine eşittir. Bu noktadan hareketle sıvı içerisinde gerçekleştirilen tartımlarla cismin hacminin bulunmasına yönelik değişik deney düzenekleri kurulmuştur. Gerek teknolojide, gerekse ölçüm biliminde yaygın olarak kullanılır. Hidrostatik tartım olarak adlandırılan bu yöntem; hava ve sıvı ortamlarında ayrı ayrı gerçekleştirilen tartımlarla hacim belirlemeyi sağlar. Şekil 330'da TÜBİTAK UME'de kullanılan Hidrostatik Tartım Sistemi şematik olarak gösterilmektedir. Hidrostatik tartım sonrası gerçekleştirilen hesaplamalardaki en önemli parametre kullanılan sıvının yoğunluğunun iyi bilinmesidir. Bu olaya günlük hayatımızdan bir örnek verecek olursak, hepimizin kişisel deneyimleriyle sabittir ki denizde yüzmek tatlı suda yüzmeye göre daha kolaydır. Bu durumun nedeni, tuzlu suyun daha yoğun olmasından dolayı yüzücüye daha fazla kaldırma kuvveti uygulamasıdır. Kaldırma kuvveti ile sıvı yoğunluğu arasındaki ilişki sebebiyle kullanılan sıvının yoğunluğunun çok iyi bilinmesi gerekir. İlk bakışta bir kısır döngü gibi görünse de sıvı yoğunluklarının hassas hidrostatik tartımla belirlenebileceğini hatırlatmakta yarar vardır. Ancak bu amaç için gerçekleştirilen deneylerde referans standart olarak hacmi interferometrik yöntemlerle bulunmuş katıların kullanılması bu kısır döngüyü ortadan kaldırmaktadır. Tartım sırasında kullanılan sıvının yoğunluk değeri sıcaklıkla değişkendir. Bu yüzden deney düzeneklerinde sıcaklık kontrollü banyolar kullanılır ve ölçüm, yoğunluk değerinin iyi bilindiği bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Saf su kullanılan ölçümlerde bu sıcaklık 20 °C'dir. Bazı ölçüm düzeneklerinde ölçümü etkileyen bir başka parametre de tartım amacıyla kullanılan terazinin üstte olması durumunda ortaya çıkar. Sıvı içindeki cisimle terazi arasındaki bağlantı bir tel ile sağlanmaktaysa telin sıvıya dalış noktasında bir üst yüzey gerilimi oluşur. Bu yüzey geriliminden kurtulmak için tam sıvıya dalış noktasında Platin - İridyumdan imal edilmiş tel ve sıvı olarak da üst yüzey gerilimi minimum olan alkan ailesinden organik hidrokarbonlar kullanılır.



Şekil 330. Hidrostatik tartım sistemi düzeneği

Referans ağırlıkların Arşimet ilkesine göre hidrostatik tartımla hacim ve yoğunluk belirleme ölçümleri önce hava ortamında daha sonra saf su ortamında gerçekleştirilir. Şekil 330'da verilen hidrostatik tartım sistemi düzeneğinde; terazi, saf su, sıcaklık kontrollü banyo, sıcaklık – nem ölçer, sayısal barometre, sayısal termometre ve kütle seti kullanılır. Bu kapsamda, standart ve numune kütle, hava ve saf su ortamlarında terazi ile tartılır. Bu tartım işlemi SNNS (standart, numune, numune, standart) çevrimi ile yerine koyma yöntemine göre en az üçer serilik ölçümlerle gerçekleştirilir. Böylece ölçümler sonunda, numune kütlenin hacim (veya yoğunluk) değeri elde edilir [205].

$$V_{Numune} = \frac{m_{Std.HavaOrt.} - m_{StdSafSuOrt.} - \rho_{HavaYoğ.HavÖlç.} V_{Std} + \rho_{HavaYoğ.SafSuÖlç.} V_{Std} + \Delta W - \Delta W^{*}}{\rho_{SafSuYoğ} - \rho_{HavaYoğHavÖlç.}} \quad (211)$$

ΔW : Hava ortamındaki tartım farkı [kg]

ΔW^{*} : Saf su ortamındaki tartım farkı [kg]

$\rho_{Hava\ Yoğ.\ Hav\ Ölç.}$: Hava ortamındaki tartım esnasında hava yoğunluğu [kg/m^3]

$\rho_{Hava\ Yoğ.\ Saf\ Su\ Ölç.}$: Saf su ortamındaki tartım esnasında hava yoğunluğu [kg/m^3]

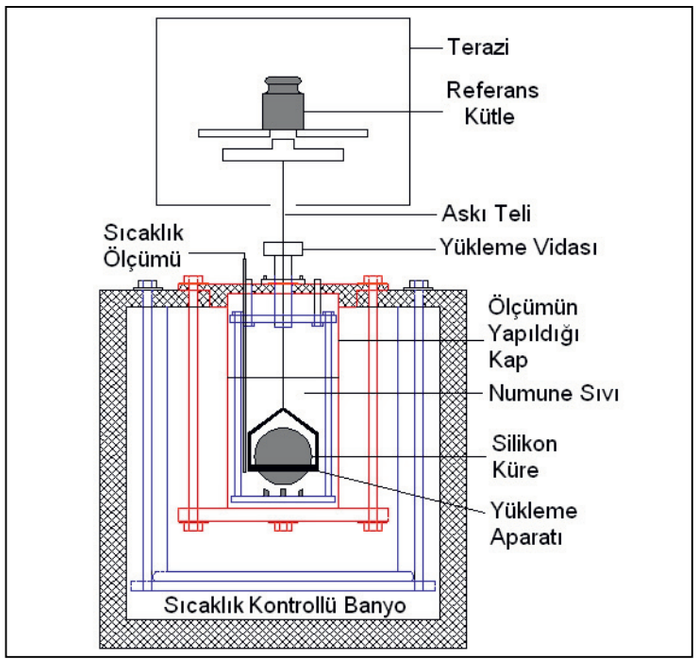
$\rho_{Saf\ Su\ Yoğ}$: Sıcaklığa bağlı saf su yoğunluğu [kg/m^3]

V_{Std} : Standart ağırlığın hacmi [m^3]

$m_{Std\ Hava\ Ort}$: Standart ağırlığın hava ortamındaki kütle değeri [kg]

$m_{Std\ Saf\ Su\ Ort}$: Standart ağırlığın saf su ortamındaki kütle değeri [kg]

V_{Numune} : Numune ağırlığın hacim değeri [m^3]



Şekil 331. Referans sıvı yoğunluğu belirleme sistemi ölçüm düzeneği

Aynı ölçüm sistemi kullanılarak Eşitlik (212) yardımıyla referans sıvıların yoğunluğu belirlenebilmektedir.

$$\rho_{Ref\,Sıvı} = \frac{m_{R\,Kür} \times \rho_{H\,Y} \times V_{Sıv\,Bat\,Tel} - \frac{g_{Küt\,Yer\,Ç}}{g_{R\,Kür\,Yer\,Ç}} \times \left[W \times \left(1 - \frac{\rho_{H\,Y}}{\rho_{T\,Küt\,Y}}\right) + W_{Küt} \times \frac{\left(1 - \frac{\rho_{H\,Y}}{\rho_{T\,Küt\,Y}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{H\,Y}}{\rho_{Tart\,Küt\,Y}}\right)} - V_{Tart\,Kütle} \times \rho_{H\,Y} \right]}{V_{R\,Kür} - V_{Sıv\,Bat\,Tel}} \quad (212)$$

$m_{R\,Kür}$: Referans kürenin kütle değeri [kg]
$\rho_{H\,Y}$: Hava yoğunluğu [kg/m^3]
$V_{Sıv\,Bat\,Tel}$: Referans sıvıya batmış telin hacmi [m^3]
$g_{Küt\,Yer\,Ç}$: Tartımda kullanılan referans ağırlıklara etkiyen yer çekimi [m/s^2]
$g_{R\,Kür\,Yer\,Ç}$: Tartımda kullanılan referans küreye etkiyen yer çekimi [m/s^2]
$\rho_{T\,Küt\,Y}$: Terazinin kalibrasyonunda kullanılan kütlenin yoğunluğu [$\rho_{T\,Küt\,Y}$ = 8000 kg/m^3]
W : Referans kürenin referans sıvı içindeki tartım değeri [kg]
$W_{Küt}$: Ölçümde kullanılan referans ağırlıkların kütle değeri [kg]
$\rho_{Tart\,Küt\,Y}$: Ölçümde kullanılan referans ağırlıkların yoğunluk değeri [kg/m^3]
$V_{Tart\,Kütle}$: Ölçümde kullanılan referans ağırlıkların hacim değeri [m^3]
$V_{R\,Kür}$: Ölçümde kullanılan referans kürenin hacim değeri [m^3]

Gravimetre, densitimetre, areometre olarak da adlandırılan hidrometreler, 500 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 aralığındaki sıvıların yoğunluğunun ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan, farklı doğruluk seviyelerinde imal edilen, basit ve etkili bir ölçü aletidir. Hidrometreler 'Cuckow' yöntemiyle hidrostatik tartım düzeneklerinde kalibre edilebilir. Bu yöntemde kalibre edilmek istenen gösterge çizgisine kadar yoğunluğu bilinen sıvıya daldırılan hidrometre bu durumdayken tartılır ve tartım değerinden gidilerek ilgili gösterge çizgisinin hangi yoğunluk değerine karşılık geldiği bulunur. Bu yöntem sayesinde farklı yoğunluklara karşılık gelen gösterge çizgileri,

yoğunluğu bilinen tek bir sıvı kullanımıyla kalibre edilebilir. Laboratuvar çalışmalarında sıklıkla kullanılan hidrometrelerin kalibreli olması gerekir [206].



Şekil 332. Hidrometre kalibrasyonu ölçüm düzeneği

Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen kalibrasyonlarda her yoğunluk göstergesinin kalibrasyonu için o yoğunluk değerlerine karşılık gelen sıvı bileşikleri kullanılması gerekir. Geleneksel yöntemle gerçekleştirilen hidrometre kalibrasyonlarında ortalama 200 adet sıvı bileşiğine ihtiyaç duyulur. Cuckow yöntemi ile yapılan hidrometre kalibrasyonları, hidrostatik tartım yöntemi ile tek bir sıvı kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntem ile söz konusu sıvıların hazırlanmasının getireceği zamansal ve ekonomik maliyet azaltılmış olur. Cuckow yönteminde referans hidrometreler önce hava ortamında sonra da belirlenen yoğunluğa denk gelen gösterge çizgisine kadar sıvıya batırılmışken hidrostatik tartım sisteminde tartılır. Değişik seviyelere batırılarak gerçekleştirilen ölçümler ile hidrometrenin tüm gösterge çizgisinin kalibrasyonu tek bir sıvı kullanılarak gerçekleştirilir [207].

Cuckow yönteminin esasları çerçevesinde elde edilen ölçüm değerleri Eşitlik (213) kullanılarak, 20 °C'de hidrometrenin ilgilenilen skala çizgisine gelen yoğunluk değeri belirlenmektedir.

$$\rho(t_B) = \left[\rho_F(t) - \rho_{LL}\right] \times \frac{W_L + (\pi/g) \times d \times \gamma(t_B)}{W_L - W_F + (\pi/g) \times d \times \gamma_F(t)} \times \left[1 + \alpha_V \times (t - t_B) + \rho_{LL}\right] \quad (213)$$

$\rho(t_B)$: İlgilenilen skala çizgisinin yoğunluk değeri [kg/m^3]
W_L : Hidrometrenin havadaki tartım değeri [kg]
W_F : Hidrometrenin sıvıdaki tartım değeri [kg]
t_B : Referans sıcaklık değeri [°C]
t : Ölçüm anındaki sıcaklık değeri [°C]
d : Hidrometre skala çizgisinin çapı [m]
$\rho_F(t)$: Ölçüm anındaki sıvı yoğunluğu [kg/m^3]
ρ_{LL} : Havada tartım esnasında hava yoğunluğu [kg/m^3]
$\gamma(t_B)$: Referans sıvının yüzey gerilimi [mN/m]
$\gamma_F(t)$: Hidrometrenin kullanıldığı sıvının yüzey gerilimi [mN/m]
α_V : Hidrometrenin hacim genleşme katsayısı [1/K]
g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]
$\rho(t_N)$: Referans hidrometreden seçilen skala çizgilerinin nominal değeri [kg/m^3]

Hacim Kaplarının Hacimsel Kapasitelerinin Belirlenmesi

Hacimsel kapasite belirleme işlemi, endüstriyel ve analitik ölçümlerde önemli bir yere sahiptir. Hacim kapları kimya, sağlık, biyoloji ve eczacılık vb. endüstrinin birçok alanında kullanılır. Kalibrasyon laboratuvarları hacim kaplarının kalibrasyonlarını yapmak suretiyle, endüstrinin birçok alanında kullanılan bu cihazların güvenilirliğini sağlarlar. Sıvılarla çalışırken söz konusu olacak muhtemel hataları tanımlamak ve bunları azaltmak için hacim kaplarının doğru yöntemlerle kalibrasyonunun yapılması gerekir. Ölçüm güvenilirliği hakkında bilgi veren ölçüm belirsizliği değeri de kalibrasyon işlemi sonunda belirtilir. Hacim kaplarının kalibrasyonu, kabın doldurulup boşaltılması veya referans bir hacim kabı ile karşılaştırılması suretiyle gerçekleştirilir. Karşılaştırma yöntemi hacim kapları kalibrasyonunda ikinci bir yöntemdir. Hacim kabının boşken daha sonra sıcaklığı ve yoğunluğu bilinen uygun bir sıvı ile doluyken tartılması kapsamında tanımlanan birinci yöntem (gravimetrik yöntem), izlenebilirlik zincirinde en yüksek seviyedeki ölçümü oluşturur.

Gravimetrik yöntem, ulusal metroloji enstitüleri ve akredite kalibrasyon laboratuvarları tarafından hacim kaplarının kalibrasyonları için kullanılan standart bir yöntemdir. Bu yöntem hacim kabının boşken tartımını, daha sonra doluyken yeniden tartımını içerir. Tam bir ölçümün yapılabilmesi için, sıvının seviye çizgisine kadar ideal menüsküsü oluşturacak şekilde doldurulması, ölçümü etkilemesi yönüyle boşaltma ve kurutma işlemlerinin doğru yapılması gerekir. Hacim kabı tartım cihazında boş ve dolu iken yapılan tartımlardan elde edilen fark, hacim kabı içindeki sıvının ağırlığıdır. Bu açıdan bakıldığında ölçümlerde kullanılan su oldukça önemlidir. Kullanılan su (distile, bi-distile veya deiyonize) olabilir, bununla birlikte kullanılan suyun iletkenliği 5 µS/cm değerinden küçük olmalıdır. Ağırlıktan hacme geçiş dönüşümü genellikle referans sıcaklık olan 20 °C'de yapılır. Buna göre hacim kaplarının hacimsel kapasitesinin belirlenmesi eşitliği, Eşitlik (214)'de verilmektedir [208][209].

$$V_0 = (I_L - I_E) \times \frac{1}{\rho_W - \rho_A} \times \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_B}\right) \times [1 - \gamma \times (t - t_0)] \qquad (214)$$

V_0 : Referans sıcaklıktaki hacim değeri [mL]

I_E : Ölçüm sıcaklığında boş hacim kabının tartım değeri [g]

I_L : Ölçüm sıcaklığında saf su ile doldurulmuş hacim kabının tartım değeri [g]

ρ_W : Ölçüm sıcaklığında saf suyun yoğunluğu [g/mL]

ρ_A : Havanın yoğunluğu [g/mL]

ρ_B : Terazi kalibrasyonunda kullanılan kütlelerin yoğunluğu [paslanmaz çelik için ρ_B = 8 g/cm^3]

γ : Kalibre edilen hacim kabının yapıldığı malzemenin ısıl genleşme katsayısı [$^\circ C^{-1}$]

t : Ölçümde kullanılan saf suyun sıcaklığı [°C]

t_0 : Referans sıcaklığı [°C]

(0 – 40) °C arasındaki saf suyun yoğunluğu, sıcaklığın fonksiyonu olarak Tanaka formülüne göre Eşitlik (215)'deki gibi bulunur [210][211][212].

$$\rho_W = a_5 \times \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 \times (t + a_2)}{a_3 \times (t + a_4)}\right] (g/mL) \quad (215)$$

t : Saf su sıcaklığı [°C]

a_1 : -3,983035 °C

a_2 : 301,797 °C

a_3 : 522528,9 $°C^2$

a_4 : 69,34881 °C

a_5 : 0,999974950 g/mL

Ölçüm ortamındaki hava basıncı 940 mbar ile 1080 mbar, hava sıcaklığı 18 °C ile 30 °C aralığında ve havanın bağıl nemi % 80 altında ise, ölçüm ortamındaki hava yoğunluğu basitleştirilmiş CIPM eşitliği (216) sayesinde bulunur [213].

$$\rho_A = \frac{k_1 \times P_A + h_r \times (k_2 \times t_A + k_3)}{t_A + 273,15} (g/mL) \quad (216)$$

t_A : Ölçüm ortamındaki hava sıcaklığı [°C]

P_A : Ölçüm ortamındaki hava basıncı [hPa]

h_r : Ölçüm ortamındaki havanın bağıl nemi [%]

k_1 : $3,4844 \times 10^{-4}$ °C/hPa

k_2 : -2,52 g/mL

k_3 : $2,0582 \times 10^{-5}$ °C

Hacim kaplarının hacimsel kapasitelerinin belirlenmesi ölçümlerindeki belirsizlik kaynakları [214]

- Kütle,
- Saf su sıcaklığı,
- Saf su yoğunluğu,
- Hava yoğunluğu,
- Kütlelerin yoğunluğu,
- Kalibre edilen hacim kabının yapıldığı malzemenin ısıl genleşme katsayısı,
- Menüsküs okuması,
- Buharlaşma,
- Ölçüm tekrarlanabilirliği,

şeklinde sıralanabilir.

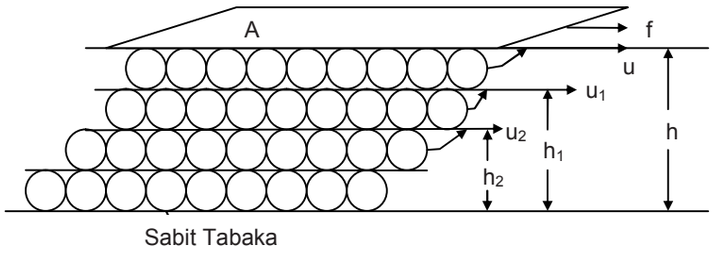
7.5.4 VİSKOZİTE

7.5.4.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Genel olarak, sıvıların akmaya karşı gösterdiği direnç olarak bilinen viskozite ilk olarak 1687 yılında Newton tarafından araştırılarak ve tamamen ayrı kabul edilen yüzeyler arasındaki sıvının iç sürtünmesine viskozite denildi. İç sürtünme bir katmanın diğer katmanla bağlantılı olarak hareket etmesi ile ortaya çıkar. Bu iç sürtünme arttıkça akışkanı hareket ettirmek için gerekli olan kuvvet değeri de artar.

Bir sıvının viskozitesi artan sıcaklık ile azalır. Bu bakımdan viskozite değerinin anlam ifade edebilmesi için daima hangi sıcaklıkta olduğunun belirtilmesi gerekir.

Sıvı katmanlarının açıklamasını görselleştirmek için Şekil 333'den yararlanabilir.



Şekil 333. Moleküler katmanlar ve akış durumu

Yağ molekülleri küçük toplarla temsil edilirse düz katmanlarda birbirleri üzerinde yuvarlanır. Moleküller ıslak olduğundan en alt tabaka hareket etmeyecektir. En üst tabaka üstteki katmanın hızı ile aradaki tabakalar ise iki yüzey arasındaki mesafe ile doğru orantılı hızla hareket edecektir. Paralel tabakalar arasındaki bu çeşit düzenli hareket "streamline", "laminer" veya "viscous" olarak bilinir [215].

Söz konusu hareket Newton tarafından Eşitlik (217)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$D = \text{Kayma hızı veya hız gradyenti} = \frac{u}{h} = \frac{u_1}{h_1} = \frac{u_2}{h_2} \cdots\cdots \quad (217)$$

Üst tabakanın sabit **u** hızı ile hareket etmesi için gerekli **kuvvet**, **tabaka alanı** ve **hız gradyenti** cinsinden aşağıdaki şekilde çıkartılmıştır.

$$F = \eta A \frac{u}{h} \quad (218)$$

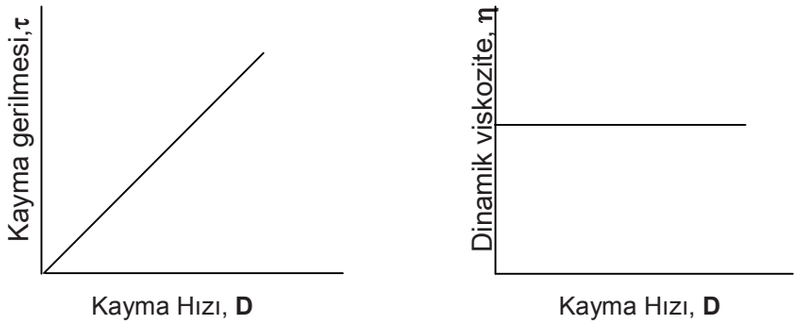
Burada η orantı katsayısıdır. Viskozite katsayısı veya mutlak viskozite olarak bilinir. Viskozite, mutlak viskozite ve dinamik viskozite hep aynı anlama gelir. Sonuçta Eşitlik (218)'yi düzenlediğimizde yaygın olarak kullanılan viskozite denklemini elde edilir.

$$\eta = \frac{F/A}{u/h} = \frac{\tau}{D} \quad (219)$$

η : Dinamik Viskozite veya Mutlak Viskozite [N s/m²]
F : Kuvvet [N]
A : Etkin temas yüzey alanı [m²]
u : Hız [m/s]
h : Yükseklik, mesafe [m]
τ : Kayma gerilimi (Shear stress) [N/m^2]
D : Kayma hızı veya hız gradyenti (Shear strain rate) [s^{-1}]

Sıvılar yukarıdaki esaslara bağlı newtonian ve non-newtonian olarak ikiye ayrılır. Newtonian sıvılarında viskozite sabit sıcaklıkta değişen kayma gerilmesine rağmen sabittir. Non-Newtonian sıvılarda ise viskozite kayma gerilmesi ile değişir.

Newtonian sıvıların akış karakteristikleri aşağıdaki grafikteki gibidir.

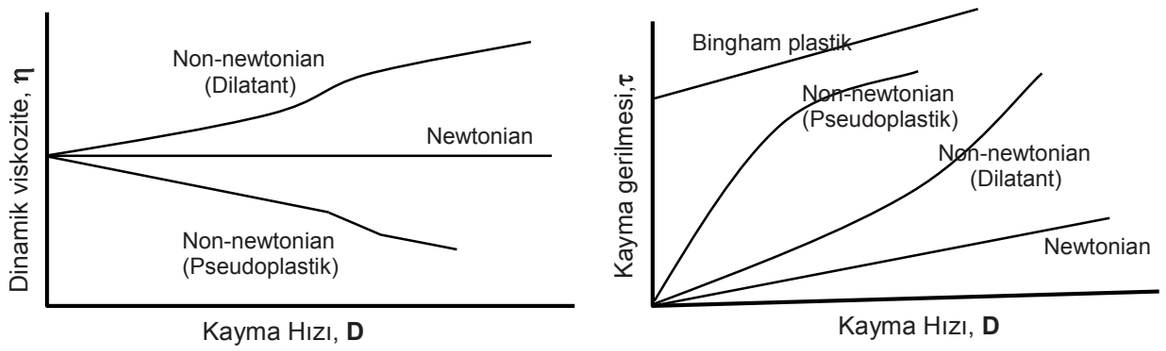


Şekil 334. Newtonian sıvıların akış karakteristik durumu

Bu tür sıvıların viskozitesini belirlemede kullanılan viskometreler;

- Akış süresinin ölçümü esasına dayanan viskometreler (Cam (Kapiler) viskometreler, Falling ball viskometreler, Akış kapları vs.)
- Rotasyonel viskometreler (MacMichael Viskometre, Brookfield/Haake viskometreler vs.)

Non-newtonian sıvıların akış karakteristikleri ise aşağıdaki grafikteki gibidir.



Şekil 335. Non-newtonian sıvıların akış karakteristik durumu

Non-newtonian sıvıların viskozitesi ancak **rotasyonel viskometreler** ile ölçmek mümkündür [216].

Pseudoplastik (Kayma-inceltme) sıvının görünür viskozitesi artan kayma hızı ile azalır olanlardır. Onların yapısı zamadan bağımsızdır.

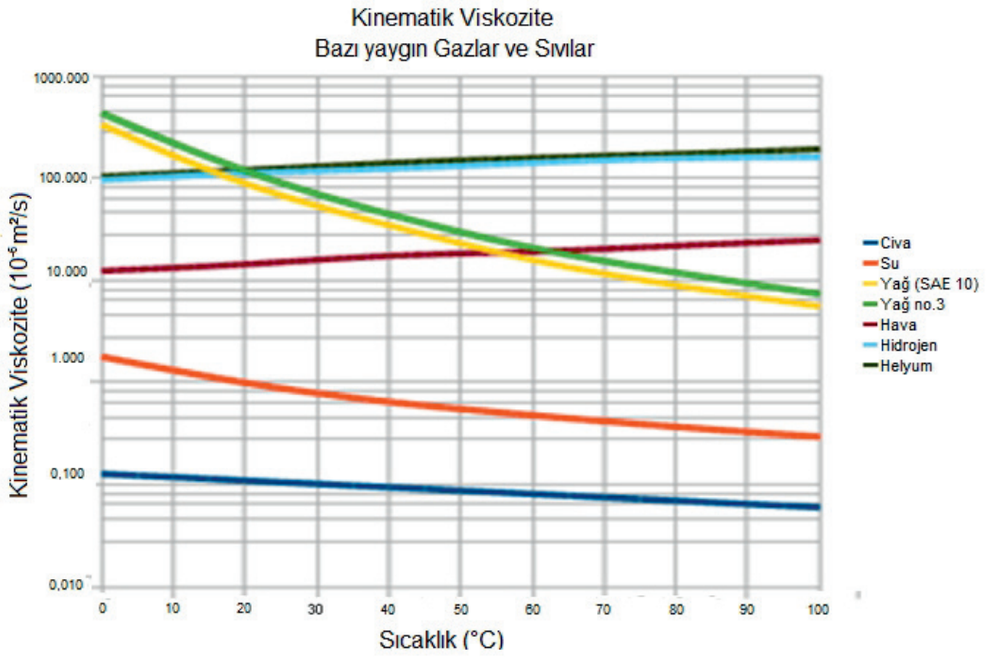
Dilatant (Kesme kalınlaşma) sıvıları karıştırma ile viskozitesi artar. Bu sıvıların bazı pompa veya boru hattı içinde neredeyse katı hale gelebilir. Karıştırma ile krema katı yağ ve şeker bileşikleri, kil çamurlar ve benzeri ağır doldurulmuş sıvı aynı şeyi yaparlar.

Bingham Plastik akışkanlar bir sıvı gibi akmaya başlayacaktır önce aşılması gereken bir eşik değeri vardır. Bu noktadan itibaren viskozite karıştıma (kayma) hızı artıkça viskozitesi azalacaktır. Diş macunu, mayonez ve domates ketçap bu tür ürünler örnekleridir.

Sıcaklığın Viskozite Üzerine Etkisi

Viskozite sıcaklık arasındaki ilişki çok önemlidir. Şekil 336'da bazı sıvılar ve gazlar için kinematik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir.

- Sıvılarda Sıcaklık arttıkça viskozite azalır.
- Gazlarda Sıcaklık artıkça viskozite artar.



Şekil 336. Bazı sıvılar ve gazlar için kinematik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi

Dinamik Viskozite

Bir sıvının deformasyonunun veya akış direncinin ölçüsüdür. Matematiksel olarak, uygulanan kuvvetin büyüklüğü, belirli bir sıcaklıkta belirli bir akışkan için sabit olan bir katsayı ile gösterilen kayma direnci ile düzeltilmiştir.

$$\eta = \frac{F/A}{u/h} = \frac{\tau}{D} \qquad (220)$$

η : Dinamik Viskozite veya Mutlak Viskozite [Pa s]
F : Kuvvet [N]
A : Etkin temas yüzey alanı [m²]
u : Hız [m/s]
h : Yükseklik, mesafe [m]
τ : Kayma Gerilmesi [N/m²]
D : Kayma Hızı [s^{-1}]

Dinamik Viskozite Birimi

$$\eta = \frac{F/A}{u/h} = \frac{N/m^2}{m/s\ /m} = N/m^2\ s = Pa\ s$$

Tablo 29. Dinamik viskozite dönüşüm tablosu

Türetilmiş Birim	Birimin Tanımı	Birimin Sembolü	Birimin SI'daki Dönüşümü
Dinamik Viskozite	Pascal saniye	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$

Kinematik Viskozite

Yerçekimi etkisi altındaki bir sıvının akış direncidir. Hidrolik uygulamalarındaki hesaplamalar çoğu zaman dinamik viskozite yerine kinematik viskozitenin kullanımını gerektirir. Kinematik viskozite akışkanın sahip olduğu dinamik viskozitesinin yoğunluğa oranlanması ile elde edilir.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad (221)$$

ν : Kinematik viskozite [m²/s]

η : Dinamik viskozite [N/m² s]

ρ : Yoğunluk [kg/m³]

Kinematik Viskozite Birimi

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{N/m^2\ s}{kg/m^3} = \frac{kg\,m/s^2\ /m^2\ s}{kg/m^3} = \frac{m^2}{s}$$

Kinematik viskozite birimi yaygın olarak mm^2/s veya santistokes (cSt) olarak ifade edilir.

Tablo 30. Kinematik viskozite dönüşüm tablosu

Türetilmiş Birim Adı	Birimin Tanımı	Birimin Sembolü	Birimin SI'daki Dönüşümü
Kinematik Viskozite	saniyede metre kare	ν	$m^2\ s^{-1}$

Viskozite Standardı, Suyun Viskozite Değeri

Saf suyun viskozitesinin temel yöntemler ile belirlenmesi, geçmişten bu yana yapılan birçok araştırmaya konu olmuştur. 1952 yılında Swindells tarafından yapılan çalışma ile iki defa destile edilmiş saf suyun normal atmosfer basınç (0,101325 MPa) altında 20 °C'de aşağıdaki dinamik viskozite (η) ve kinematik viskozite (ν) değerlerini bulmuştur.

η_w = 1,0019 mPa s

ν_w = 1,0038 mm^2/s

Bu değerlerin her ikisi de % 0,25 bağıl belirsizlik ile bulmuştur.

Bu değerler suyun viskozitesi için uluslararası standart olarak kabul edilmiş ve ISO/TR 3666:1977'de yer almıştır.

Uluslararası sıcaklık skalası IPTS-48'in ITS – 90 olarak değişmesi bu değerlerin değişmesine neden olmuştur. Çünkü bu değerler IPTS – 48'e göre bulunmuştur.

IPTS – 48'de 20,000°C derece ITS – 90'da 19,988 °C'dir. Bu 12 mK'lik fark yukardaki değerlerin değişmesine yol aşmıştır. Bu durumda ITS – 90'e göre yeni değerler aşağıdaki gibidir.

Bulunan bu değerler SI'daki yedi temel birimden türetilmiş bir birim olan viskozite için izlenebilirliğin gerçekleştirilmesinde kullanıldı.

η_W = 1,0016 mPa s

ν_W = 1,0034 mm^2/s

ρ_W = 0,99820 g/cm^3 (iki defa destile edilmiş suyun 20 °C'deki yoğunluğu)

Bağıl belirsizlikte % 0,17 olarak bulunmuştur.

Bu değerler suyun viskozitesi için uluslararası standart olarak kabul edilmiş ve ISO/TR 3666:1998'de yer alır.

Viskozite Standardı (Viskozite Skalası)

Birçok endüstri uygulamalarında viskozite ölçümü büyük önem taşır. Bu fiziksel özelliği ölçmek için birçok method ve ölçüm cihazı geliştirildi. Ancak önemli olan ölçümün doğruluğu, güvenirliği ve kararlığıdır. Bu bakımdan viskozite skalasının kurulmasında yüksek doğruluklu ve kararlı ölçüme ulaşmak için cam kapiler viskometre kullanımı tercih edilir.

Bağımsız viskozite skalası oluşturmak için, metrolojik olarak temel kabul edilen suyun viskozitesi kullanılır. Suyun temel olarak kullanılmasının avantajı kolay elde edilmesi, dezavantajı ise suyun yüzey gerilmesinin yüksek olmasıdır. Bunun için yüzey gerilme düzeltmesi yapılır. Ayrıca skala kurulmasında kullanılan sıvılar newtonian sıvılardır. Newtonian sıvılarının tümünde kayma gerilmesi ile kayma hızı arasında doğrusal ilişki vardır. Bu özelliğinden dolayı akış zamanı uzun süre kararlılık gösterir. Bu tür sıvılar ile cam kapiler viskometreler kullanılarak Viskozite Skalası oluşturulur.

Şekil 337'de TÜBİTAK UME'de oluşturulan Viskozite Skalası verilmektedir. Viskozite skalası 34 viskometre ile (0,5 - 100 000) mm^2/s ölçüm aralığını kapsamaktadır.

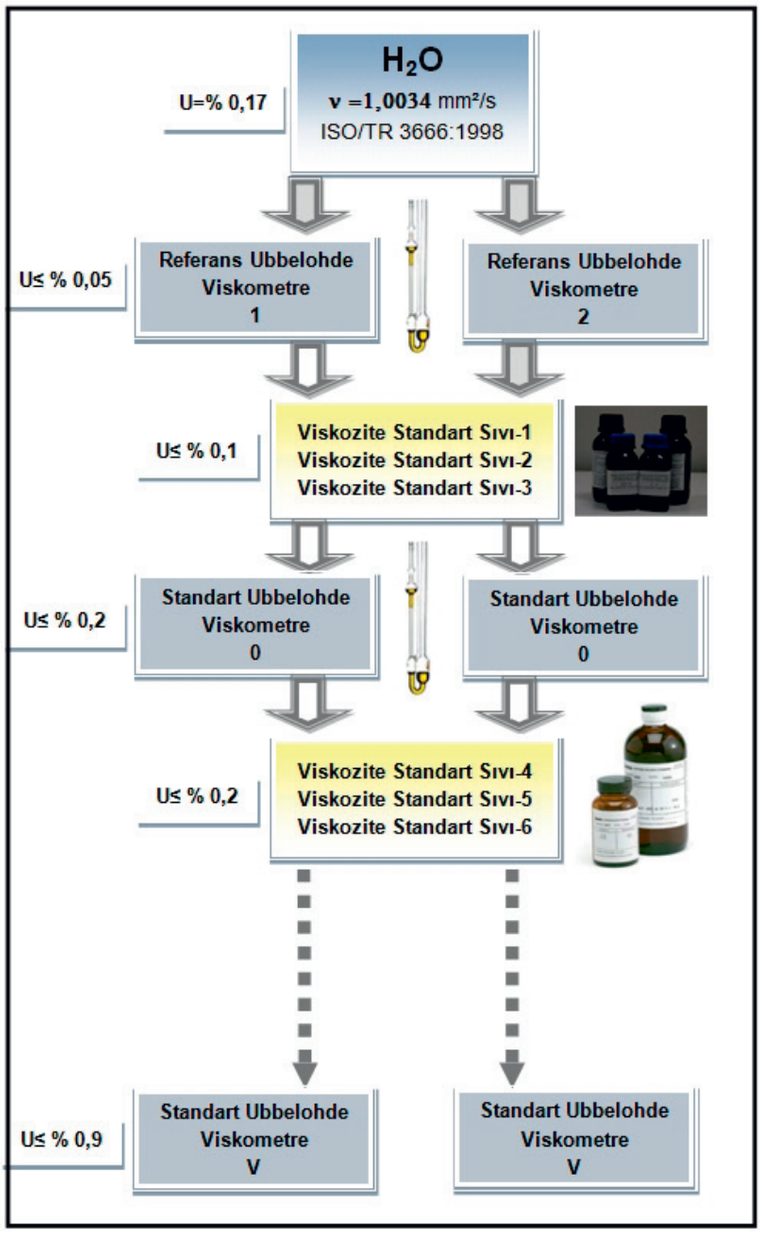
7.5.4.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Viskozite ölçümleri endüstrinin ihtiyacına bağlı olarak çeşitli tipte viskometreler ile gerçekleştirilir.

- Dönüm Hareketli Viskometreler,
- MacMichael Viskometre,
- Stormer Viskometre,
- Falling Ball Viskometre,
- Saybolt Viskometre,
- Kapiler Tüplü Viskometreler.

Bu viskometreler içinde en hassas ve yüksek doğruluklu ölçüm yapılabilen viskometreler kapiler tüplü viskometrelerdir.

Viskozite ölçümünün yüksek doğruluk ve güvenirlilikle yapılması, viskozite ölçüm cihazlarının da test ve kalibrasyonunu gerektirir. Bu cihazların kalibrasyonu da standart sıvı (kalibreli newtonian sıvısı) kullanımı ile mümkündür.



Şekil 337. TÜBİTAK UME viskozite standardı (Viskozite Skalası)

Dönüm Hareketli Viskometreler

Dönüm hareketli viskometreler birinin hareket ettirilirken diğerinin hareketsiz kaldığı ve aralarındaki boşluğun test sıvısı ile doldurulduğu iki temel elemana sahiptir. Viskozite ölçümleri ya sabit tork etkisi altında dönüm hızının ölçülmesi ya da hareketli elamanın sabit hızla döndürülmesi esnasında sabit elaman üzerinde oluşan reaksiyon torkunun ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu viskometreler Poseydo plastik ve dilatant numunelerin karakterizasyonunda mükemmeldir.

Falling Ball Viskometre

Bu tip viskometrelerde sadece newtonian sıvılarının viskozitesi belirlenebilir. Ölçüm esası akış zamanına dayanır. Bu viskometre ile -20 °C ile 120 °C arasındaki sıcaklıklarda 0,6 mPa s ile 250 000 mPa s arasındaki sıvıların ölçümü yapılabilir.



Şekil 338. Falling Ball viskometre

MacMichael Viskometre

Temel olarak içi test edilecek sıvı numunesi ile doldurulmuş bir kap içerisine daldırılmış ve bir telle asılmış bir diskten ibarettir. Kap sabit hızla döndürülürken numune sıvı da diski döndürmeye çalışır ve askı telinde burulma oluşur. Telin üst ucunda yerleştirilmiş bir gösterge vasıtasıyla burulma açısı ölçülür. Açının büyüklüğü ile test edilen yağın viskozitesi ilişkilendirilmiş olur.

Stormer Viskometre

Bu tip viskometrede test edilecek sıvının konduğu sabit bir kap ve bu kaba yerleştirilmiş bir silindir ile bu silindire hareket veren bir kasnak, ağırlık düzeneğine sahiptir. Sıvının viskozitesi silindirin 100 dönüm yapması için geçen süreye göre ölçülür.

Kapiler Tüplü Viskometreler

Kapiler tüp, çapı çok küçük olan uzun bir tüptür. Kapiler etki ise tüp yüzeyi ile temas halinde olan sıvının yükselme veya alçalma hareketidir. Sıvı akışkanın viskozite değerinin belirlenmesinde kapiler tüplerin kullanımı Poiseuille ve Hagen tarafından aynı zamanda geliştirilmiş olan belirli kanunlara dayanır [217]. Buna göre,

$$\upsilon = \frac{\pi \times R^4 \times g \times h_m}{8 \times V \times L} \times t$$

υ : Kinematik viskozite [m²/s]

R : Kapiler tüpteki deliğin çapı [m]

g : Yer çekim ivmesi [m/s²]

h_m : Ortalama yükseklik [m]

L : Kapiler tüp uzunluğu [m]

V : Akış süresince kapiler tüpten geçen sıvı hacmi [m^3]

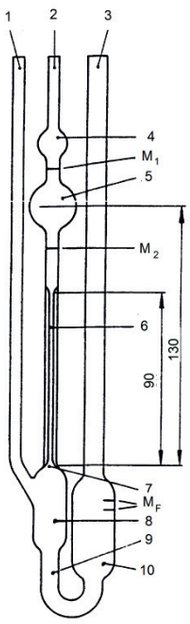
t : Akış zamanı [s]

Kapiler Tüplü Viskometreler, EN ISO 3104 ve 3105 no'lu normlarda Tablo 31'deki gibi sınıflandırılmıştır [218].

Tablo 31. Kapiler tüplü viskometreler

Viskometre Çeşitleri		Viskometre Adı	Kinematik Viskozite Aralığı mm²/s
A	Şeffaf sıvılar için Otswald tipi Viskometreler	Cannon-Fenske routine Zeitfuchs BS/U-tube BS/U/M miniature SIL Cannon-Manning semi-micro Pinkevitch	0,5 – 20 000 0,6 – 3 000 0,9 – 10 000 0,2 – 100 0,6 – 10 000 0,4 – 20 000 0,6 -17 000
B	Şeffaf sıvılar için Daldırma seviyeli Viskometreler	BS/IP/SL BS/IP/SL (S) BS/IP/MSL Ubbelohde FitzSimons Atlantic Cannon-Ubbelohde (A) Cannon-Ubbelohde dilution (B) Cannon-Ubbelohde semi-micro DIN Ubbelohde	3,5 – 100 000 1,05 – 10 000 0,6 – 3 000 0,3 – 100 000 0,6 – 1 200 0,75 – 5 000 0,5 – 100 000 0,5 – 100 000 0,4 – 20 000 0,35 – 50 000
C	Şeffaf ve Mat sıvılar için Ters akışlı Viskometreler	Cannon-Fenske opaque Zeitfuchs cross-arm BS/IP/RF U-tube reverse-flow Lantz-Zeitfuchs type reverse-flow	0,4 – 20 000 0,6 – 100 000 0,6 – 300 000 60 – 100 000

Ubbelohde Viskometre



1- Havalandırma borusu
2- Kılcal boru
3- Doldurma borusu
4- Üst sıvı deposu
5- Zaman ölçme haznesi
6- Kılcal (kapiler)
7- Daldırma seviye haznesi
8- Daldırma seviyesi
9- Bağlantı borusu
10- Alt sıvı deposu

M_1 ve M_2 Zaman sayma çizgileri

M_F Doldurma Çizgisi

Şekil 339. Ubbelohde viskometre

Ubbelohde Viskometre ile Kinematik Viskozite Değerinin Belirlenmesi

Akış Zamanının Belirlenmesi

Ubbelohde viskometreler ile newtonian sıvının viskozite değerini bulmak için öncelikle farklı ölçüm aralıklarına sahip viskometrelerden aynı sınıfta (0 – V) iki tane viskometre seçilir. Bu seçimi yaparken numune sıvının önceki sertifikasından kinematik viskozite değerine göre veya tahmini kinematik viskozite değerine göre viskometre seçilir [219].

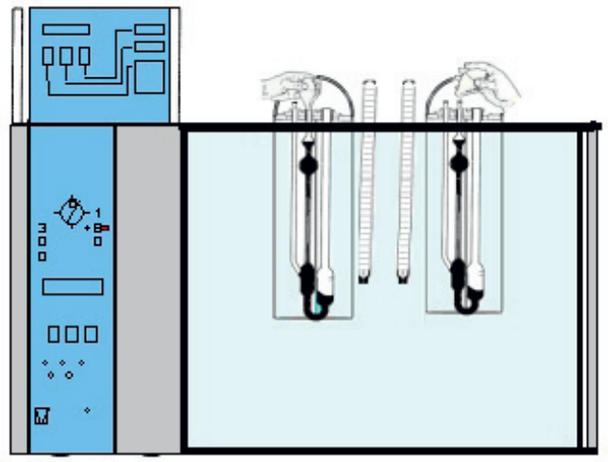
Viskometre sınıfını belirledikten sonra, mutlaka iki aynı sınıfa sahip viskometre kullanılarak aşağıdaki işlemler gerçekleştirerek numune sıvının akış zamanları tespit edilir.

1. Viskometreler uygun tutaca yerleştirilir.
2. Sıcaklık banyosu ölçülecek sıcaklığa ayar edilir.
3. Numune sıvı belirlenen viskometrelere Şekil 339'da MF işareti ile belirtilen doldurma çizgilerinin arasına gelecek şekilde Şekil 340'daki gibi doldurulur.



Şekil 340. Ubbelode viskometre doldurma şekli

4. Numune sıvı dolu viskometreler sıcaklık banyosuna Şekil 341'deki gibi yerleştirilir. Yerleştirme işleminden önce yüzeyin düz olup olmadığına su düzeci ile bakılır.



Şekil 341. Kinematik viskozite ölçüm düzeneği

5. Ölçüm süresince banyoya yerleştirilen viskometrelerin birbirlerine değmemesi gerekir. Bunun için dikey olarak da düz olması gereklidir.
6. Viskometre banyoya yerleştirildikten sonra 20 dakika bekletilir.
7. Viskometre Şekil 339'da 1 numara ile ifade edilen havalandırma borusu üstten bir aparat (tapa) ile kapatılır.

8. Viskometre Şekil 339'da 2 numara ile ifade edilen kılcal borusunun üstten ya emme ile ya da bir aparat kullanılıp vakumlanarak içerdeki sıvı 4 numara ile ifade edilen üst sıvı deposunun yaklaşık üst seviyeye kadar yükseltilir (hava kabarcığı oluşmaması için işlem oldukça yavaş yapılmalıdır). Vakumlama işlemi bittikten sonra boru üstten bir aparat (tapa) ile kapatılır.
9. Viskometrenin havalandırma borusu üstten açılır ve sıvının Şekil 339'da 8 numara ile ifade edilen daldırma seviyesinin alt kısmına kadar hareket etmesi beklenir (~ 5 dak.).
10. Viskometre Şekil 339'da 2 numara ile ifade edilen kılcal borusu tekrar açılır ve sıvının kılcal borudan aşağı doğru hareket etmesi gözlenir ve M1 ile ifade edilen çizgiye geldiğinde kronometre çalıştırılır. Sıvı M2 ile ifade edilen çizgiye geldiğinde kronometre durdurulur. Kronometrede okunan değer protokole kaydedilir
11. Her iki viskometre için yukarıdaki 7, 8, 9 ve 10. aşamaları tekrar edilerek 5 akış değeri kaydedilir. Eğer akış zamanı 400 s'den fazla ise üç ölçüm de yapılabilir [219].

Kinematik Viskozitenin Hesaplanması

Kinematik viskozitenin hesaplanması için aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir [219].

1. Her bir viskometre için ortalama akış zamanı belirlenir.

$$t = \frac{1}{n}\sum t_i$$

2. Her bir viskometre için aşağıdaki formülden kinematik viskozite değeri hesap edilir.

$$u = \frac{\pi \times R^4 \times g \times h_m}{8 \times V \times L} \times t$$

$$u = K \times t$$

$$u = K \times (t - \Delta t_H) \times \frac{g}{g'}$$

Δt_H : Kinetik enerji düzeltmesi (Sadece 0 ile I nolu viskometreler için yapılır) [s]

g : Ölçümün yapıldığı yerdeki yerçekimi değeri [m/s²]

g' : Kullanılan viskometrenin kalibrasyonu yapıldığı yerdeki yerçekimi değeri [m/s²]

K : Viskometre sabiti [m²/s²]

3. Her iki viskometre için bulunan kinematik viskozite değerlerinin ortalaması alınır.

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2}$$

4. Dinamik viskozite değeri için, sıvının ölçüm sıcaklığındaki yoğunluk değeri ile kinematik viskozite değerinin çarpılır.

$$\eta = \nu \times \rho$$

η : Dinamik viskozite [Pa s]

ν : Kinematik viskozite [m²/s]

ρ : Yoğunluk değeri [kg/m³]

Saybolt Viskometre

Amerikan Standard Oil firmasından George Saybolt tarafından geliştirilmiş olan cihazdır. Bu yöntemle akışkanın viskozitesini belirlemek için, test edilecek sıvı yağ haznesine doldurulur. Daha sonra ölçüm banyosu ölçüm sıcaklığına gelinceye kadar bekletilir. Saybolt çıkış tüpünün alt ucundan tapa çekilerek alınır. Altta yerleştirilmiş olan behere sabit atmosferik basınç altında 60 ml'lik test sıvısının dolması için geçen saniye cinsinden zaman Saybolt viskozitesi olarak ifade edilir. Bu ölçümün birimi Saybolt Universal Saniye olup genellikle SUS veya SSU olarak gösterilir. Saybolt cihazı için standart sıcaklıklar 100 °F, 130 °F ve 210 °F'dır. 32 s'lik SUS değerinden küçük sıvılar Saybolt viskometre ile test edilmez.

Kinematik Viskozitenin SUS Viskozitesine Dönüşümü:

100 °F veya 210 °F'daki cSt cinsinden kinematik viskozitenin SUS viskozitesine dönüşümü için çeşitli tabloların kullanılmasının yanı sıra ASTM D 2161'e göre aşağıda verilmiş olan formül 70-300 °F arasındaki sıcaklıklarda 2 cSt'dan büyük kinematik viskoziteler için kullanılır [220].

$$SUS = [1{,}0 + 0{,}000061\ (t - 100)] \left[4{,}6324\ \nu + \frac{1{,}0 + 0{,}03264\ \nu}{(3930{,}2 + 262{,}7\ \nu + 23{,}97\ \nu^2 + 1{,}646\ \nu^3) \times 10^{-5}}\right]$$

ν : Kinematik Viskozite [cSt]

t : Sıcaklık [°F]

Saybolt Universal'in Kinematik Viskoziteye Dönüşümü:

Akış süresi 32 s ile 100 s arasında ise; $\nu = 0{,}226 \times t - \frac{195}{t}$

Akış süresi 100 s 'nin üzerinde ise; $\nu = 0{,}220 \times t - \frac{135}{t}$

Saybolt Furol Viskometre

100 °F Saybolt viskozite, Saybolt Universal ile aynı olup, aralarındaki fark sıvının geçtiği deliğin 10 defa büyük olmasıdır. Saybolt Furol viskozitenin 10 ile çarpımı SUS cinsinden viskoziteyi verir [221].

Saybolt Furol'un Kinematik Viskoziteye Dönüşümü:

Akış süresi 25 s ile 40 s arasında ise; $\nu = 2{,}24 \times t - \frac{184}{t}$

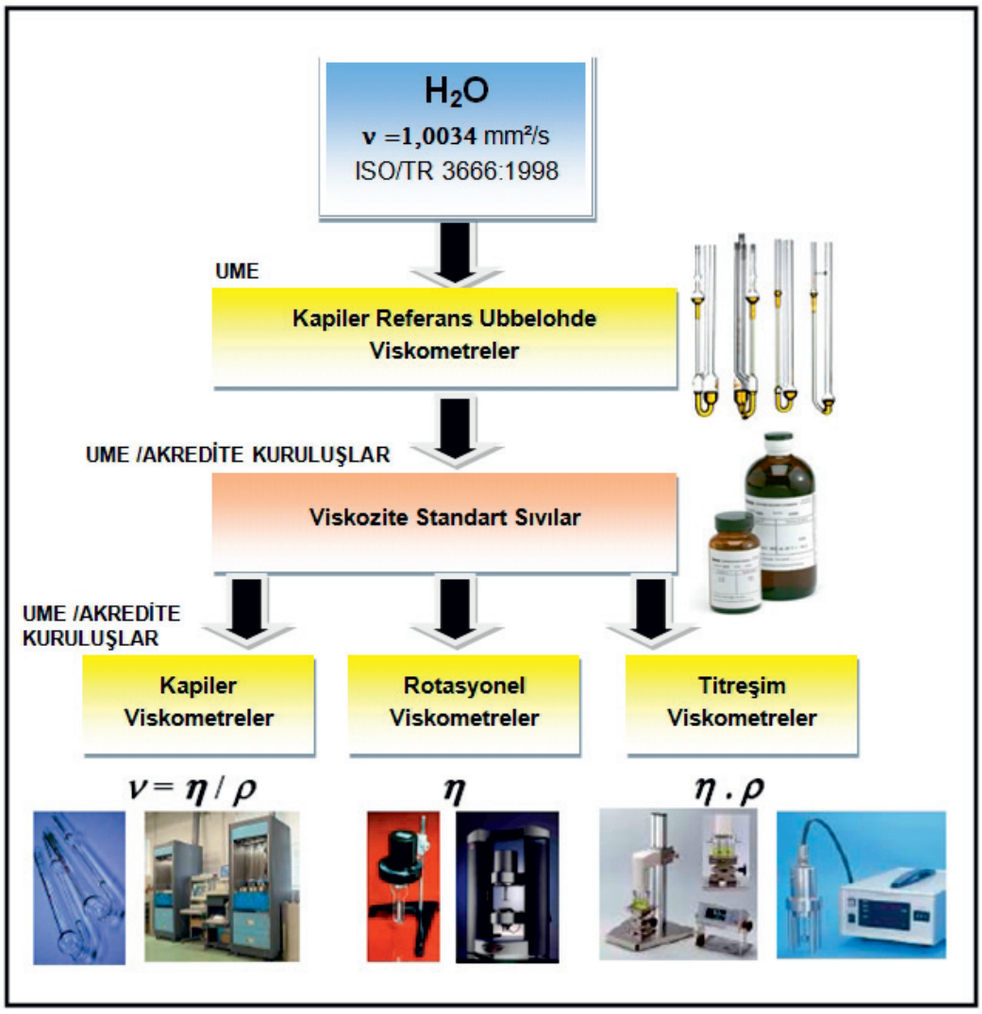
Akış süresi 40 s 'nin üzerinde ise; $\nu = 2{,}16 \times t - \frac{60}{t}$

Akış Kapları

Akış kapları newtonian sıvıların kinematik viskoziteleri ölçümünde kullanır.

DIN, ASTM, AFNOR ve ISO standartlarında üretilen DIN, ISO, AFNOR, SHELL, FORD ve ZAHN kapları mevcuttur. Hepsinin ortak özellikleri ofisten geçen akış zamanın ölçülmesidir. Akış zamanının ölçülmesi sonrası, ilgili standartta verilen formül kullanılarak kinematik viskozite değeri belirlenir. Örneğin, FORD kap 2 için ASTM D 1200 standardında yer alan aşağıdaki formül kullanılır [222].

$$\nu = 1{,}44 \times (t - 18{,}0)$$



Şekil 342. Viskozite birimi izlenebilirlik zinciri

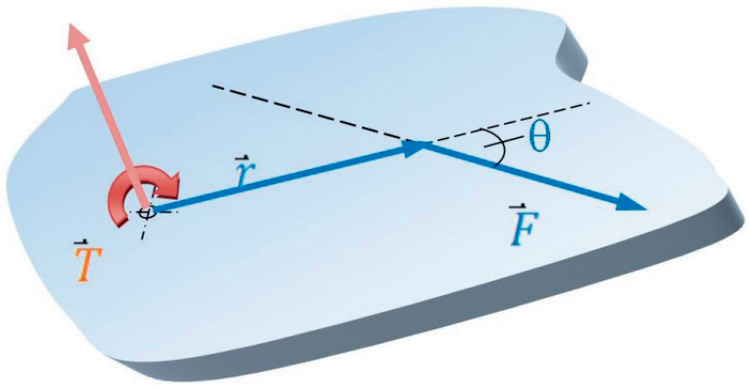
7.5.5 TORK

Genel olarak, kuvvetin döndürme etkisine moment denir. Tork ifadesi ise yaygın olarak moment ifadesinin özel bir hali için kullanılır. Bu hal, momentin bir eksen etrafında olma halidir. Kısacası, bir kuvvetin veya kuvvet sisteminin bir cismi bir eksen etrafında döndürme eğilimine tork ve/veya dönme momenti denir [223]. Tork vektörel bir büyüklüktür ve kuvvetin uygulanma noktasının dönme eksenine olan uzaklığı ile uygulanan kuvvetin vektörel çarpımına eşittir (Eşitlik (222), Eşitlik (223)).

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \tag{222}$$

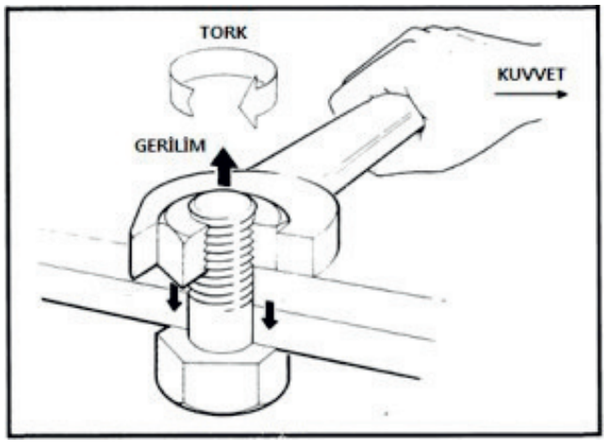
$$T = F\, r \sin\theta \tag{223}$$

Eşitlik (222) tork değerini vektörel olarak ifade ederken, Eşitlik (223) ise tork büyüklüğünün skaler değerini vermektedir.



Şekil 343. Tork (dönme momenti)

Günlük hayatımızda, çoklukla kullandığımız kapı, pencere, musluk, kapak gibi ekipmanların açıp kapama işlemi birer tork uygulaması olmasına rağmen bu uygulamalar esnasında tork ölçümü yapılmaz. Endüstride ise, bunun aksine tork uygulamalarının yapıldığı yerlerde tork ölçümü de beraberinde yerini alır. En yaygın tork uygulamaları vidaların sıkıştırılmasında (Şekil 344) ve güç aktarımının yapıldığı yerlerde (mil, dişli kutusu, motor, pompa gibi) karşımıza çıkar.



Şekil 344. Tork uygulamasına bir örnek, vidalı bağlantı.

Genel kabul olarak tork ölçme cihazlarında ölçme yönü, saat yönü ise pozitif, saat yönünün tersi ise negatif alınır.

7.5.5.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

SI sistemine göre tork türetilmiş bir büyüklüktür ve birimi N m'dir. SI birim sisteminde, birim torku (1 N m) oluşturabilmek için 1 N'luk kuvvetin 1 m'lik dik uzaklıktaki döndürme etkisi göze alınmalıdır.

$$1\,[\mathrm{N\,m}] = 1\left[\frac{\mathrm{kg\,m^2}}{\mathrm{s^2}}\right]$$

SI birim sistemine göre torkun açık ifadesi.

$$1\,[\mathrm{N\,m}] = 1[\mathrm{N}] \times 1[\mathrm{m}] \times \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

SI birim sistemine göre birim torkun gerçeklenmesi.

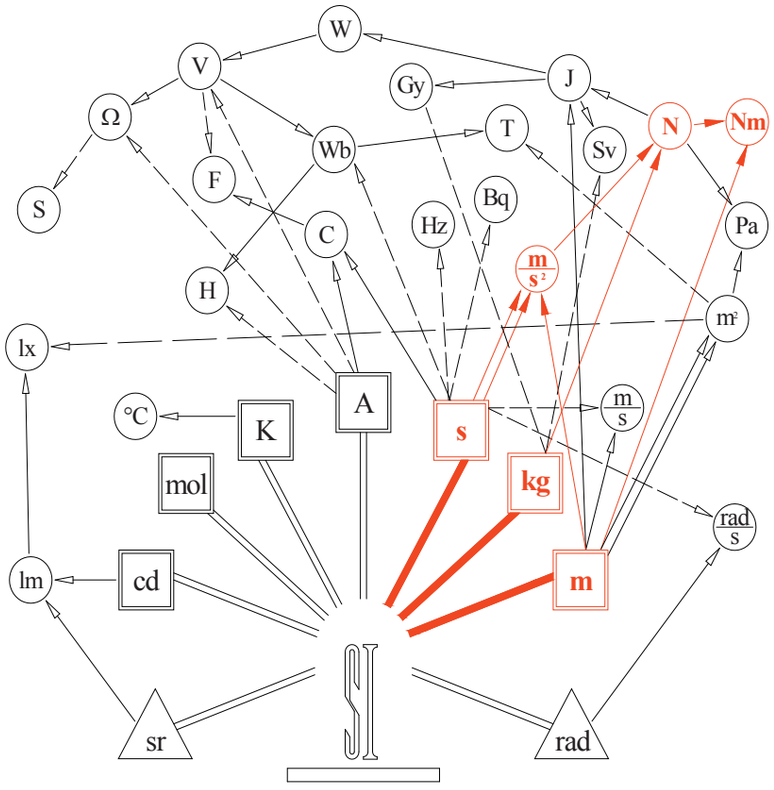
SI-birim sisteminde enerji ve/veya iş birimi ile tork birimi analojik olarak aynı olmalarına karşın torkun vektörel bir büyüklük olduğu, enerjinin ise skaler bir büyüklük olduğu ve ayrı fiziksel büyüklükleri ifade ettikleri unutulmamalıdır.

Yaygın olarak kullanılan birim sistemleri ve bu sistemlere ait tork birimlerinin ifadeleri şöyledir;

SI Birim Sistemi	N m, N cm
MKS Birim Sistemi	kgf m, kgf cm
İngiliz Birim Sistemi	lbf ft, lbf in, ozf in
CGS Birim Sistemi	dyne cm (g cm^2/s^2)

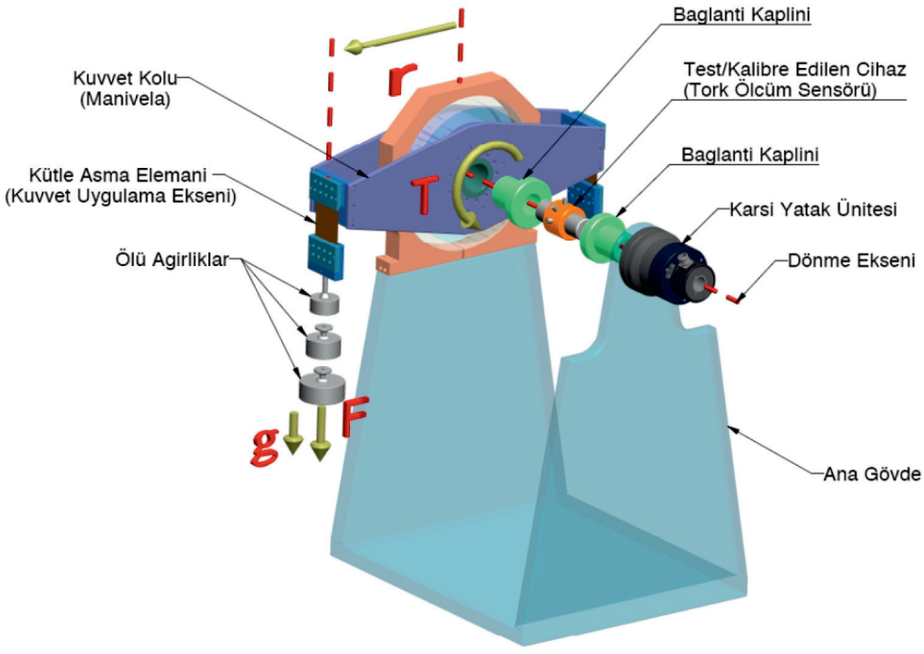
Tablo 32. Tork birimleri için dönüşüm oranları.

	N m	ozf in	lbf in	lbf ft	kgf m
1 N m	1	141,611969	8,850732	0,737561	0,101972
1 N cm	0,01	1,416120	0,088507	0,007376	0,0010120
1 ozf in	0,007062	1	0,062500	0,005208	0,000720
1 lbf in	0,112985	16,000028	1	0,083333	0,011521
1 lbf ft	1,355820	192,000340	12,000000	1	0,138255
1 kgf m	9,806650	1388,739020	86,796035	7,233003	1
1 kgf cm	0,098067	13,887390	0,867960	0,072330	0,01
1 dyne cm	1×10^{-7}	$1{,}416120\times10^{-5}$	$8{,}850732\times10^{-7}$	$7{,}375610\times10^{-8}$	$1{,}019716\times10^{-8}$



Şekil 345. SI Birim ağacında tork biriminin yeri

Torkun tanımından yola çıkarak (Eşitlik (222) ve (223)) *l* boyundaki bir manivela ile ona asılmış yerçekimi ivmesi ve havanın kaldırma kuvveti etkisi altındaki kütlelerin oluşturacağı, manivela-kütle sistemi ile yüksek hassasiyette ve doğrulukta tork birimi gerçeklenebilir. Bu prensiple tork birimini gerçekleyen ulusal referanslara, tork standardı makineleri denir (Şekil 346).

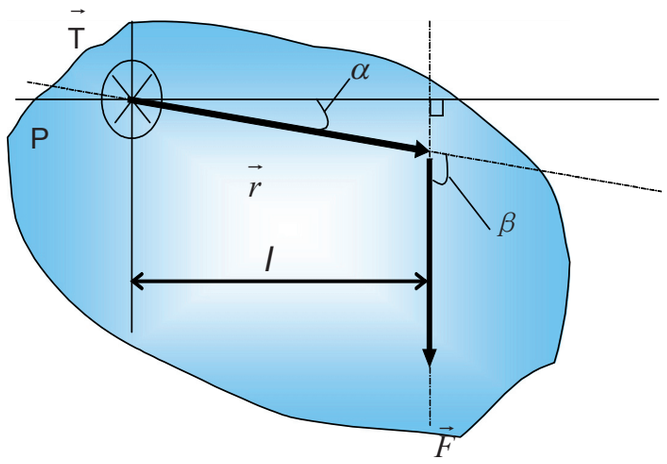


Şekil 346. Tork biriminin elde edilmesi. Tork standardı makinesinin şematik görünümü

Ulusal referansların dışında kalan ve tork kalibrasyonlarında kullanılan diğer tüm cihazlara, ulusal referanslar ile aynı yapıda olsalar bile, tork kalibrasyon makineleri denir.

25 kN m'nin üstündeki tork değerlerinin elde edilmesinde ekonomik nedenlerden dolayı manivela-kütle sistemi yerine yaygın olarak kuvvet dönüştürücülü tork standardı makineleri kullanılır.

Tork birimini elde etmek için kullanılan, manivela-kütle sistemi ile çalışan tork standardı makinelerinin matematiksel modeli Eşitlik (224) ile verilir.



Şekil 347. Tork biriminin elde edilmesi için kullanılan fiziksel model

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F}$$

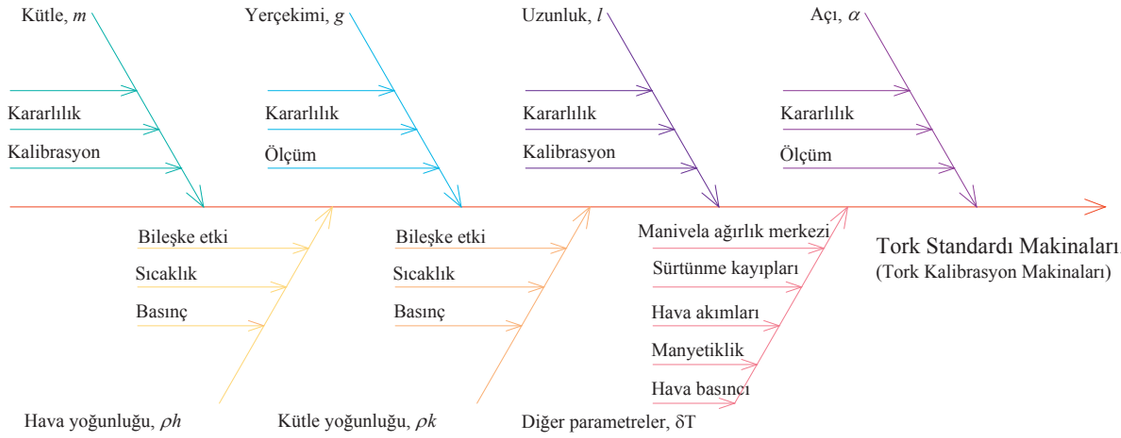
$$\left.\begin{aligned} T &= F\, r \sin\beta \\ |\vec{r}| &= r = l \\ r \sin\beta &= l \cos\alpha \\ |\vec{F}| &= F = m\, g_{yer} \left(1 - \frac{\rho_h}{\rho_k}\right) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad T = m\, g_{yer}\ \left(1 - \frac{\rho_h}{\rho_k}\right) \cos\alpha \qquad (224)$$

Eşitlik (224)'de verilen modeli gerçeklemek üzere kullanılan manivela-kütle sistemi (Şekil 347), sisteme etki eden parametrelerin yeterince hassas kontrol edilmesi koşulu ile tork değerini 2×10^{-5} düzeyinde bir bağıl belirsizlik ile tork birimini gerçekleyebilir. Şekil 348'de bu modeli uygulayan bir tork kalibrasyon makinesine etki eden parametrelerin şematik görünümü verilmiştir.

Şekil 348'de verilen bozucu etkilerin ışığında Eşitlik (224) aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$T = m\, g\, l \left(1 - \frac{\rho_h}{\rho_k}\right) \cos\alpha + \sum T_{\substack{\text{bozucu} \\ \text{etkiler}}} \qquad (225)$$

$$T = m\ g_{yer}\, l \left(1 - \frac{\rho_h}{\rho_k}\right) \cos\alpha + \delta T_{surtunme} + \delta T_{g,manivela} + \delta T_{basınc} + \delta T_{hakım} + \delta T_{manyetik} \qquad (226)$$



Şekil 348. Tork standardı makinelerinin (tork kalibrasyon makinelerine) etki eden parametrelerin genel ifadesi

Eşitlik (226)'ya göre tork biriminin elde edilmesinde ağırlık olarak kullanılan kütleler, hassas teraziler ve ulusal kütle standardına izlenebilir olarak kalibre edilmiş olmalıdır. Ağırlık olarak kullanılacak kütlelerin yoğunlukları ile bunların kullanılacağı laboratuvarın hava yoğunluğu da aynı şekilde ölçülmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.

Tork standardı makineleri için makinelerin kurulu olduğu yere ait yerel yerçekimi ivmesinin de ölçülmesi gerekir.

Tork kol boyu l, ulusal uzunluk standardına izlenebilir olmalıdır. Tork kol boyu değerinin hesaplanması esnasında; kol boyu ölçümünden kaynaklanan belirsizlik, kol boyunun nominal değerden sapmasının getirdiği belirsizlik, sıcaklı değişiminin kol boyu üzerindeki etkisinden kaynaklanan belirsizlik, kolun yük altındaki seyiminden kaynaklanan belirsizlik ve kolun yatay eksenden sapmasından kaynaklanan belirsizlik dikkate alınmalıdır.

Tork kolunu oluşturan manivelanın yataklanmasından kaynaklanan sürtünme kayıpları da mutlak bilinmeli ve toplam belirsizlik değerine eklenmelidir. Sürtünme kayıplarını azaltmak için havalı yataklama elemanları tork standardı makinelerinde sıklıkla kullanılır.

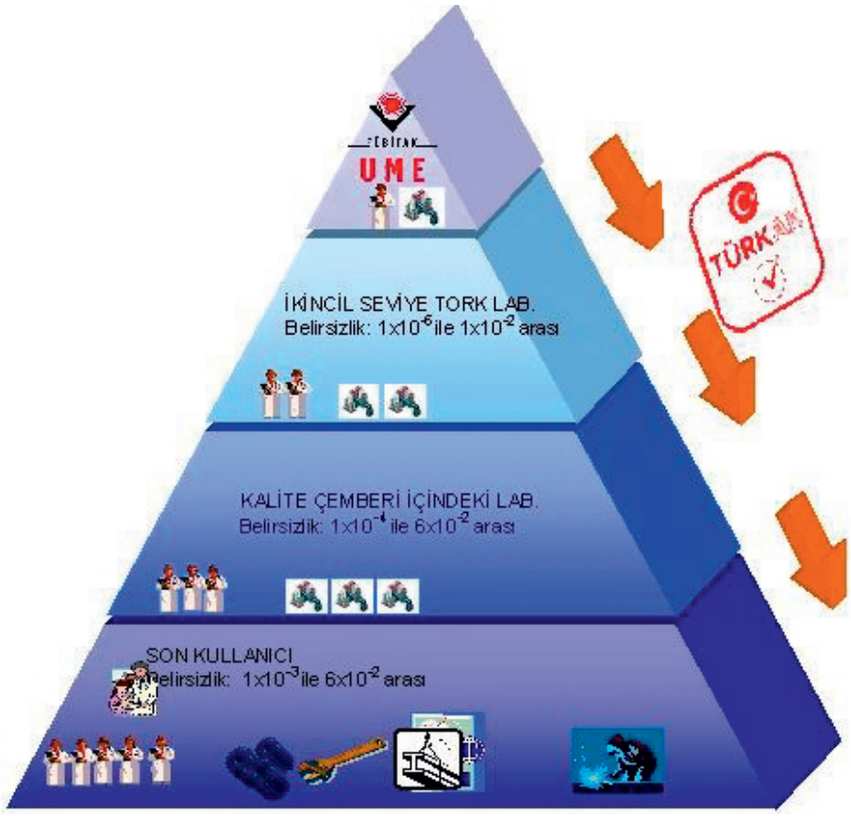
Manivela pozisyonlama hatası ile manivela ağırlık merkezinin tork uygulama ekseninden sapması sonucu oluşabilecek hata yine toplam belirsizlik bütçesine dahil edilmelidir.

Bunların dışında kalan hata kaynakları ve bozucu parametreler (Şekil 348) tork standardı makinesinin tasarımına bağlı olarak test edilmeli ve tork ölçüm değeri üzerindeki etkisi gözlenmelidir.

Tork İzlenebilirlik Zinciri

Tork izlenebilirlik zinciri, ulusal tork standardı makinelerinden basit tork ölçme cihazlarına kadar tüm tork ölçme cihazlarının birbirlerine göre izlenebilirliğinin ifadesidir. (Şekil 349).

Torkun uygulanması esnasında karşılaşılan yöntemlerden dolayı tork izlenebilirlik zinciri iki kola ayrılır. Birinci kol sadece yalın torkun izlenebilirliğini gösterirken, ikinci kol eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri ile beraber torkun izlenebilirliğini ifade eder. Her iki kola ait uygun tork transfer standartları ile tork standardı makinesi ile elde edilen tork birimi ülke içinde kullanılan diğer tork kalibrasyon makinelerine taşınır, oradan da tork ölçüm cihazlarının izlenebilirlikleri sağlanarak tork izlenebilirlik zinciri tamamlanır. Birinci kol için yüksek hassasiyet ve doğruluktaki tork dönüştürücüleri, ikinci kol için yüksek doğruluktaki tork anahtarları kullanılır.

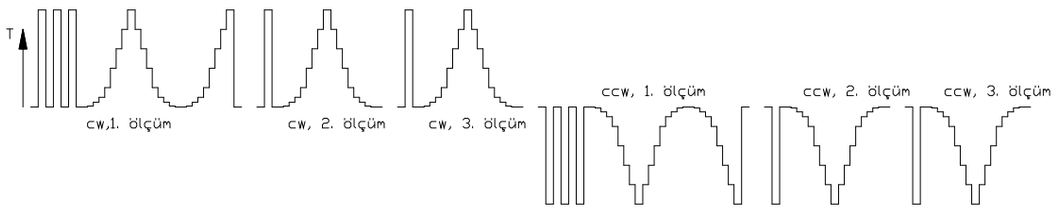


Şekil 349. Tork izlenebilirlik zinciri

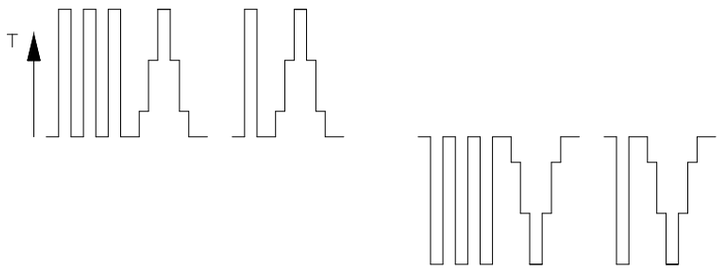
7.5.5.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Tork ölçme cihazları; tork dönüştürücüsü, tork metre, tork anahtarı ve tork tornavidası gibi yapılarına veya kullanım özelliklerine bağlı olarak çeşitli adlar alır. Tork ölçme cihazları temel olarak statik ve dinamik tork ölçme cihazları olarak iki grup altında da toplanabilir. Tork izlenebilirlik zincirindeki tork standardı makinelerinden tüm tork kalibrasyon cihazlarına kadar izlenebilirlik sağlamak amacı ile kullanılan tüm kalibrasyon cihazları statik kalibrasyon yöntemlerine göre kalibrasyon hizmeti verir. Bu nedenle dinamik tork ölçme cihazları da statik yöntemlere göre kalibre edilir. Uygulamada dinamik yöntem ve prosedürlere göre yapılan çalışmalar bir kalibrasyon işleminden daha çok doğrulama amacı taşır.

Statik olarak yapılan kalibrasyon hizmetlerinin dayandığı ölçme prosedür ve yöntemleri de, tork ölçme cihazının tork koluna sahip olup olmamasına bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Bu nedenle yüksek doğruluğa sahip bir tork anahtarının kol boyunun değişiminden etkilenip etkilenmediği kontrol edilmelidir. Bu nedenle bu tip cihazlar için tork kolunun değişiminden gelecek hatalar belirsizlik bütçesine katılmalıdır. Kol boyunun etkisi dışındaki diğer tüm parametreler tüm tork ölçme cihazlarında aynı olarak kabul edilir. Bu parametreler; tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, tersinebilirlik, çözünürlük, sıfıra geri dönüş ve doğrusallıktan sapma veya gösterge hatası ile referans cihazdan gelecek hatalar olarak ifade edilir. Tüm bu parametreler tork ölçme cihazından beklenen hassasiyete göre belirsizlik bütçesine dahil edilir. Bu parametrelerin dışında tork ölçme cihazının kullanımı esnasında karşılaşılabilecek çeşitli hata kaynakları (sıcaklık değişimi, dinamik etkiler, cihazın uzun dönem kararlılığı vb.) kullanıcı tarafından ayrıca dikkate alınmalı ve belirsizlik bütçesine eklenmelidir. Çünkü normal bir kalibrasyon işleminde bu etkiler gözlenmez.



Şekil 350. Hassas tork ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için yaygın kullanılan ölçüm dizgisi şeması örneği



Şekil 351. Basit tork ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan ölçüm dizgisi şeması örneği

Tork ölçme cihazına ait kalibrasyon bütçesi hazırlanırken kullanılan model fonksiyon Eşitlik (227)'de verilmiştir. T_k referans cihaz tarafından uygulanan tork değeri, $Y(T_k)$ ise kalibre edilen tork cihazına uygulanan tork değerine verdiği tepkiyi (gösterge değeri) ifade eder [224][225].

$$Y(T_k) = T_k \prod_{i=1}^{n} (1 - \delta X_i) \qquad (227)$$

Tork ölçüm büyüklüğüne kalibrasyon esnasında etki edebilecek (model fonksiyonunda yer alabilecek) olası hata parametreleri (δX_i) Tablo 33'de verilmiştir.

Tablo 33. Tork ölçme cihazlarının kalibrasyonu esnasında dikkate alınan olası parametreler.

δX_1	r	Kalibre edilen tork ölçme cihazına ait göstergenin sıfır noktasındaki çözünürlüğünden kaynaklanan etkiler (sıfır okuma hatası)
δX_2	r	Kalibre edilen tork ölçme cihazına ait göstergenin ölçülen tork değerine ait çözünürlüğünden kaynaklanan etkiler (tork değer okuma hatası)
δX_3	b	Yeniden üretilebilirlik hatası, farklı koşullarda altındaki tekrarlanabilirlilik hatası
δX_4	b'	Aynı koşullar altındaki tekrarlanabilirlik hatası
δX_5	b_l	Tork kolu olan cihazlar için tork kolunun değişiminden kaynaklanan tekrarlanabilirlik hatası
δX_6	f_0	Sıfıra geri dönüş hatası
δX_7	f_a veya f_q	Doğruluktan / Lineeriteden sapma hatası veya gösterge hatası
δX_8	h	Tersinebilirlik (histerisiz) hatası
δX_9	W_{ref}	Referans cihazdan (tork kalibrasyon cihazından) gelen hatalar
Ek parametreler (uygulamaya bağlı olarak ek parametrelerin sayısı artırılabilinir)		

δX_{10}	Kalibre edilen tork ölçme cihazının uzun dönem kararlılığı
δX_{11}	Kalibrasyon esnasındaki sıcaklık değeri ile kalibre edilen tork ölçme cihazının kullanım esnasındaki sıcaklığın farklı olmasından kaynaklanan değişimler.
δX_{12}	Bağlantı kaplinlerinin tork ölçme cihazına etkisi.

Eşitlik (227) ile Tablo 33'den yararlanarak tanımsız skalalı tork ölçme cihazlarının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği W_{tc}, ölçüme etki eden parametrelerin varyansları oranında Eşitlik (228) ve (229) ile hesaplanabilir.

$$W_{tc} = k\, w_{tc}\,, \quad k=2 \tag{228}$$

$$w_{tc} = \sqrt{w_{ref}^2(\delta X_9) + \sum_1^8 w^2(\delta X_i)} \tag{229}$$

Eşitlik (229)'da verilen denklem kalibre edilen cihazın uygulama alanına bağlı olarak değişikliğe uğratılabilir. Örneğin birçok uygulama için histerisiz (δX_8) hatası belirsizlik bütçesi dışında tutulur. (Eşitlik (230)). Ayrıca, lineerite için birinci derecen bir doğru kullanılır ise (δX_7) doğruluk hatası belirsizlik bütçesine doğrudan katılabilir (Eşitlik (230)).

$$w_{tc} = \sqrt{w_{ref}^2(\delta X_9) + \sum_1^6 w^2(\delta X_i) + \delta X_6} \tag{230}$$

Tablo 33'de verilen ek parametreler için kalibrasyon esnasında veri alınmadığından, bu parametreler ile ilgili verilerin kullanıcı tarafından değerlendirmeye alınması gerekir. Eşitlik (229) ve Eşitlik (230)'a bu ek parametreler ayrıca eklenebilir. Tork kolu olmayan cihazlar için δX_5 değerinin hesaplanmasına gerek yoktur.

Tanımlı skalalı cihazlar, kalibrasyon işleminden sonra genellikle ayar işlemine tabi tutulmazlar, bu nedenle tanımlı skalalı tork ölçme cihazları için ölçüm belirsizliği yerine belirsizlik aralığı (W'_{tc}) ifadesinin kullanılması daha uygun olur (Eşitlik (231)). Tanımlı skalalı tork ölçme cihazları için gösterge hatası (veya doğruluktan sapma) ile histerisiz hatası sistematik hata olarak ele alınır ve ölçüm belirsizlik bütçesine haricen eklenerek belirsizlik aralığı elde edilir.

$$W'_{tc} = \left|\delta X_{8,\text{gösterge hatası}}\right| + \left|\frac{\delta X_{8,\text{histerisiz hatası}}}{2}\right| + \sqrt{w_{ref}^2(\delta X_9) + \sum_1^6 w^2(\delta X_i)} \tag{231}$$

Eşitlik (227) ve (231)'de verilen belirsizlik denklemleri ile Tablo 33 ve Tablo 34'de verilen belirsizlik parametreleri ve onlara ait dağılım fonksiyonları tavsiye amaçlıdır, uygulamaya bağlı olarak kullanılacak kalibrasyon standardına göre bu denklem ve parametreler değişiklik gösterebilirler [224][225].

Tablo 34. Tork ölçme cihazlarının belirsizliğine etki eden parametrelerin dağılım fonksiyonları

Parametre	Dağılım Fonksiyonu	Bağıl Standart Sapma *w* (%)
Çözünürlük, r	Tip B Dikdörtgen dağılım	$w_r = \frac{\left(\frac{r}{2}\right)}{\sqrt{3}} \times \frac{100}{T_k}$
Bağıl yeniden üretilebilirlik hatası, b	Tip B Dikdörtgen dağılım	$w_b = \frac{\left(\frac{b}{2}\right)}{\sqrt{3}} \times \frac{100}{Y(T_k)}$
Bağıl tekrarlanabilirlik hatası b' Aynı montaj pozisyonundaki	Tip B Dikdörtgen dağılım	$w_{b'} = \frac{\left(\frac{b'}{2}\right)}{\sqrt{3}} \times \frac{100}{Y(T_k)}$
Bağıl tekrarlanabilirlik hatası, b_l Farklı kol boyları için	Tip B U dağılım	$w_{bl} = \frac{\left(\frac{b_l}{2}\right)}{\sqrt{2}} \times \frac{100}{Y(T_k)}$
Bağıl sıfır hatası, f_0	Tip B Dikdörtgen dağılım	$w_{f0} = \frac{\left(\frac{f_0}{2}\right)}{\sqrt{3}} \times \frac{100}{Y(T_E)}$
Bağıl enterpolasyon hatası, f_a	Tip B Üçgen dağılım	$w_{fa} = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right)}{\sqrt{6}} \times \frac{100}{Y(T_k)}$
Bağıl tersinebilirlik hatası, h*	Tip B Dikdörtgen dağılım	$w_h = \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{\sqrt{3}} \times \frac{100}{Y(T_k)}$
*Bazı standartlarda histerisiz rastlantısal hata olarak da ele alınabilir. Bu nedenle, tabloda dağılım fonksiyonu verilmiştir. Ama aslında, histerisiz hatası sistematik hata olmasın nedeniyle genellikle belirsizlik bütçesine dahil edilmez, bunun yerine belirsizlik aralığına eklenir.		

7.5.6 SERTLİK

7.5.6.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Günlük yaşantımızda kullandığımız ürünler kullanım amaçlarına göre mekanik etkilere maruz kalır. Bu etkiler altında ürünlerde beklenmeyen bir deformasyon ve dolayısıyla bir hasar oluşması ürünlerin üretiminde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine bağlıdır. Üretimde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin ölçülmesi, amacına uygun ve doğru malzeme seçimi açısından önemlidir. Günümüz endüstrisinde yaşanan rekabet ve ilerleyen teknolojiyle daha kaliteli ve güvenilir ürünleri tüketiciye sunmak isteyen üreticiler, üretim esnasında kullandıkları malzemelerle ilgili çeşitli mekanik testler uygularlar. Malzeme testlerinin ana amacı, ürünlerde kullanılan malzemelerin uygunluğunu belirlemektir. Böylece uygun olmayan malzemelerin kullanılmaması veya daha iyi malzemelerin geliştirilmesinin sağlanmasıyla, ortaya çıkabilecek muhtemel arızalar ve hasarlar önlenmiş ve olası tehlike ve zararların önüne geçilmiş olur. Malzemelerin mukavemeti, sünekliği ve aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanında Sertlik özellikleri de üretimde çok yaygın olarak kullanılan ve kolay ölçülebilen bir malzeme özelliğidir. Üretim aşamalarında prosesin kontrolünün sağlanması, imalatı gerçekleştirilen tüm ürünlerde kalitenin gerçekleşmesini sağlayan çok önemli bir faktör olmuştur. Bunun gerçekleşebilmesinin tek yolu ise üretim esnasında kullanılan ölçüm ve test cihazlarının doğruluğunun belirlenmesidir. İmalat ve kullanım özellikleri doğru bilinen malzeme kullanmak, tasarım aşamasından ürün aşamasına kadar olan tüm proseslerde ekonomik ve daha güvenilir ürünlerin geliştirilmesini ve üretimini sağlar. Bu amaçla ülkemizde ulusal sertlik ölçeğimizin oluşturularak kullanılan sertlik test cihazlarının doğruluğunun belirlenmesi ve iyileştirilmesi doğrudan ürün kalitesine yansır.

Mühendisler ve metalürjistler uzun süredir malzemenin mekanik özelliklerini belirleme anlamında sertlik ölçümü gerçekleştirirler. 1822'de malzemelerin yüzeylerinin bir elmasa sürtülmesi ve bunun sonucunda oluşan çiziğin genişliğinin ölçülmesi prensibi ile sertlik ölçümü gerçekleştirilirdi [226]. Bu yöntemi ilk olarak F. Mohs kullanmış ve standart olarak belirlediği 10 adet malzemeyi 1'den 10'a kadar sıralayarak Mohs Sertlik Ölçeğini oluşturmuştur. Bu referanslardan en yumuşağı 1 Mohs değerinde olan Talk (Talc), en sert olanı ise 10 Mohs sertlik değerine sahip olan ve doğal olarak en sert malzeme olarak bilinen Elmas'tır. 1900'de J. A. Brinell sert malzemeden yapılmış bilyenin malzeme yüzeyine belirli bir kuvvet ile bastırılarak iz oluşturması ve iz büyüklüğünün ölçülmesi esasına dayanan Brinell sertlik ölçme yöntemini ortaya koyar [226]. Brinell sertliğine alternatif olarak ortaya çıkan Vickers sertliği olarak anılan piramit şekilli ucun kullanılarak iz oluşturma yöntemi ise 1924 yılında R. L. Smith ve G. E. Sandland tarafından geliştirildi [226]. Ucun malzeme içine dalma miktarının ölçümü ile gerçekleştirilen ve dünyada en çok kullanılan Rockwell sertlik ölçme yönteminin fikri 1908'de Paul Ludwik tarafından ortaya atılmış patenti ise Hugh M. Rockwell ve Stanley P. Rockwell tarafından 1919 yılında alınmıştır [226].

Sertliğin Tanımı

Sertlik, en genel ve en çok kabul edilen şekliyle, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bu tanıma göre gerçekleştirilecek sertlik ölçümünün iki adımdan oluştuğu düşünülebilir. Birincisi, sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyi üzerinde standart koşullar altında ve standart yöntemler ile deformasyon (iz) oluşturmak, ikincisi ise, malzemenin oluşturulan bu deformasyona karşı direncinin büyüklüğünü (iz büyüklüğünü) ölçmektir. Bu durumda deformasyon (iz) ne kadar küçük ise malzeme o kadar sert, ne kadar büyük ise malzeme o kadar yumuşaktır.

Sertlik Ölçeğinin Oluşturulması

Sertlik ölçümü standart bir metodun uygulanması sonucu oluşan iz büyüklüğünün ölçümü ile gerçekleştirilir ve en genel haliyle uygulanan kuvvetin oluşan izin alanına oranı olarak ifade edilir. Genel anlamda sertlik aşağıdaki deneysel formül ile hesaplanabilir:

$$\text{Sertlik} = \frac{\text{Uygulanan Kuvvet (Yük)}}{\text{Meydana Gelen İzin Alanı (Büyüklüğü)}} \qquad (232)$$

Bazı sertlik ölçüm yöntemlerinde ise oluşan izin alanı yerine derinliği ölçülerek sertlik hesaplanır. Bir sertlik ölçeğini 4 ana bileşen oluşturur. Bu bileşenler;

- Kuvvet
- Uç
- İz ölçme sistemi
- Test döngüsü

Sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyi üzerine deformasyon (iz) oluşturmak için uygulanacak kuvvetin belirli değerlerde ve doğruluk değerlerine sahip olması gerekir. Test cihazlarında % 1, referans makinelerde ise % 0,1 doğruluk değerlerine sahip olması gereken kuvvetler, ucun üzerine titreşim yapmadan ve darbesiz uygulanır. Kuvvet yardımıyla ucun malzeme içine dalması sağlanır. Kuvvet ölü ağırlık, ölü ağırlık-manivela sistemi veya referans kuvvet dönüştürücü ile uygulanır.

Kuvvetin uygulandığı batıcı uçlar ise sert malzemelerden yapılmış olup belirli bir geometriye sahiptirler. Rockwell sertliğinde küresel-konik elmas uç, 1,587 5 mm ve 3,175 mm tungsten karbür bilye uçlar, Brinell sertliğinde 1 mm, 2,5 mm, 5 mm ve 10 mm tungsten karbür bilye uçlar kullanılır. Vickers ve Knoop sertlik ölçeklerinde ise sırasıyla kare tabanlı piramid ve rhombic şekilli elmas uçlar kullanılır. Bilye uçların çapları ve malzemeleri, elmas uçların tepe açıları, açı eksenellikleri ve yüzey düzgünlükleri önemli parametrelerdir. Şekil 352'de Rockwell, Brinell ve Vickers sertlik uçları görülmektedir.



a)Rockwell ucu b)Brinell ucu c)Vickers ucu

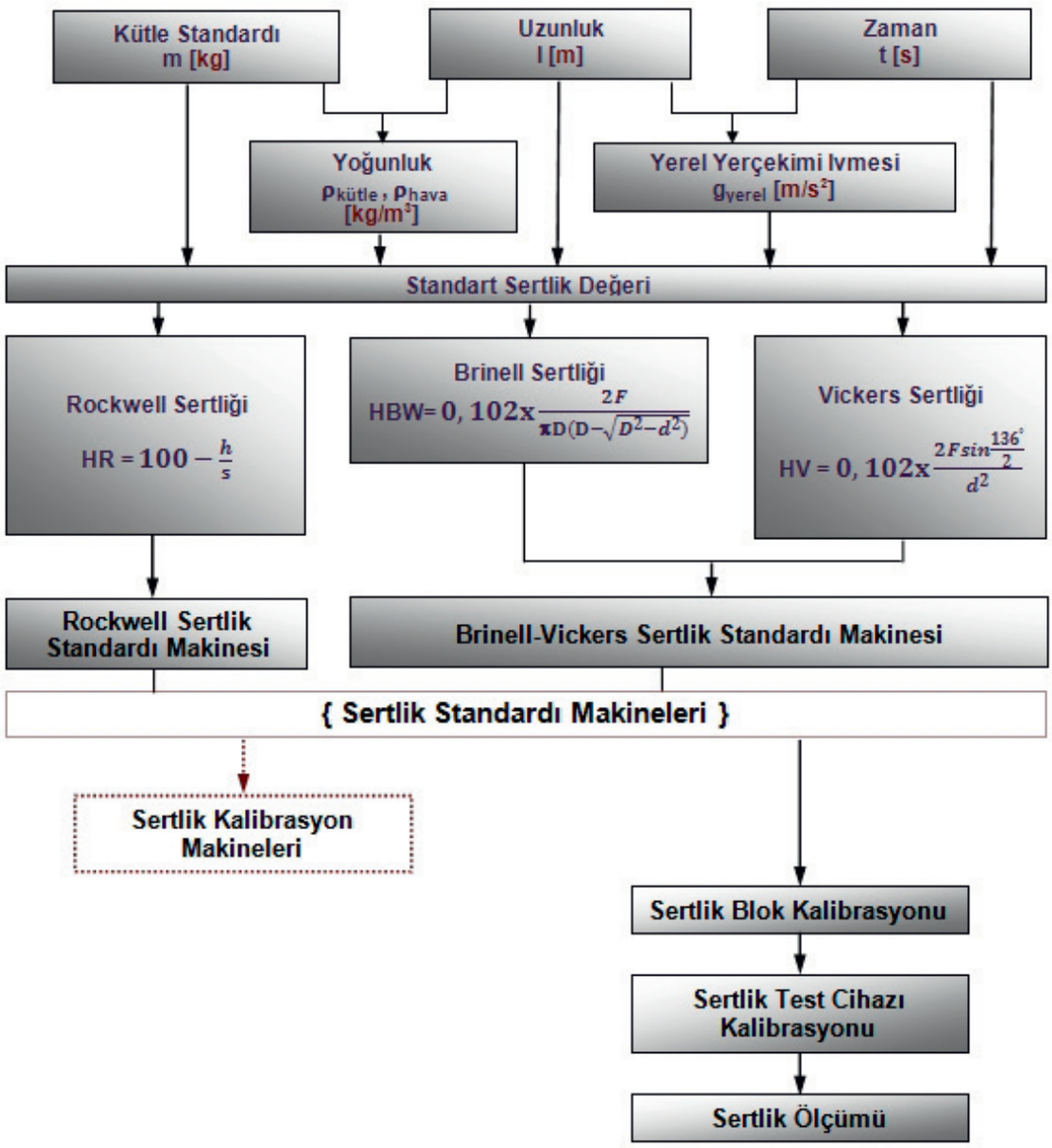
Şekil 352. Sertlik uçları

İz büyüklüklerini ölçmek için iz ölçme sistemleri kullanılır. Rockwell sertliğinde dalma derinliği ölçüm sensörleri; Brinell, Vickers ve Knoop sertliklerinde ise iz çap (Brinell) ve köşegen uzunlukları (Vickers, Knoop) ölçümü gerçekleştiren sistemler mevcuttur. Dalma derinliği ölçümü için kullanılan sensörler komparatör, mesafe ölçüm probu veya lazer enterferometre olabilir. İz alanı ölçümleri için ışık mikroskobu ve kamera görüntüleme sistemi kullanılır.

Test döngüsünü ise kuvvetin uygulandığı hızlar ile zaman dilimleri oluşturur. Kuvvetin hızlı veya yavaş uygulanması, kısa veya uzun bir süre boyunca ucun üzerinde tutulması oluşturulacak izin büyüklüğünü değiştireceği için bu parametrelerin de standardize edilmesi gerekir.

İzlenebilirlik Zinciri

Bir sertlik ölçeğini oluşturan bileşenlerin ulusal kütle, uzunluk ve zaman standartlarına izlenebilirliğini gösteren şema aşağıdadır. Şemaya göre kütle, uzunluk ve zaman standardından kuvvet türetilir. Uzunluk standardından uçların geometrik özellikleri ve iz ölçme sistemlerinin izlenebilirliği sağlanır. Test döngüsü ise uzunluk ve zaman standartlarından türetilerek bir sertlik ölçeğini oluşturan 4 bileşenin temel büyüklüklere bağlanması gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 353. Sertlik ölçeğinin oluşturulması ve izlenebilirlik zinciri

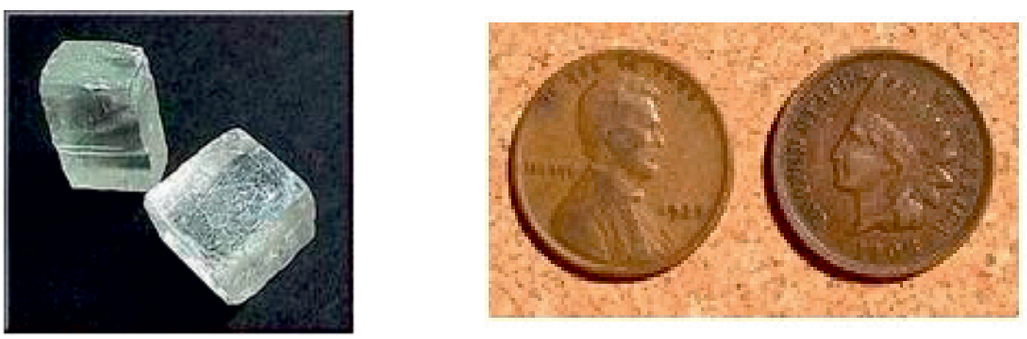
7.5.6.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Sertlik ölçümü hızlı, kolay, ucuz ve aynı zamanda malzemenin mekanik özellikleri hakkında bilgi veriyor olması dolayısıyla sanayinin vazgeçilmez test yöntemlerinden birisidir. Metal malzemelerin sertlik ölçümlerinin yanında plastik ve kauçuk malzemelerin de sertlik ölçümleri benzer yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Ayrıca metroloji dünyasında pek de yaygın olmamasına rağmen sanayide kullanılabilen çeşitli sertlik ölçme yöntemleri ve ölçekleri de mevcuttur. Bu ölçeklere Barcol sertliği, Leeb sertliği, Wallace sertliği, Mohs sertliği, Webster sertliğini örnek verebiliriz. Yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

- Çizme-Çizilme Sertliği
- Dinamik Sertlik
- Statik Sertlik
  - Metal Malzemelerin Sertliği
    - Rockwell Sertliği
    - Brinell Sertliği
    - Vickers Sertliği
    - Knoop Sertliği
  - Plastik ve Kauçuk Malzemelerin Sertliği
    - Shore Sertliği
    - IRHD Sertliği (International Rubber Hardness Degree)

Çizme/Çizilme Sertliği

Çizme/Çizilme sertliği bilinen en eski sertlik ölçme yöntemlerindendir ve mineralojistler tarafından bulunmuştur. Bu sertlik ölçme yönteminin temeli, bir katı maddenin başka bir katı maddeyi çizebilme veya daha başka bir katı madde tarafından çizilebilme prensibine dayanır. Bu yöntem 1822'de Mohs tarafından ortaya konulmuştu ve bu sertlik ölçeğine Mohs sertliği de denilebilir. Mohs, sertliklerini deney yoluyla ortaya koyduğu 10 adet minerali sertlik referans standardı olarak seçmiş ve bu minerallerin sertlik değerlerini 1'den 10'a kadar ölçeklendirmiştir. Bu minerallerin malzemeleri çizebilme yeteneklerine bakarak malzemelerin sertliklerini belirleme yoluna gitmiştir.

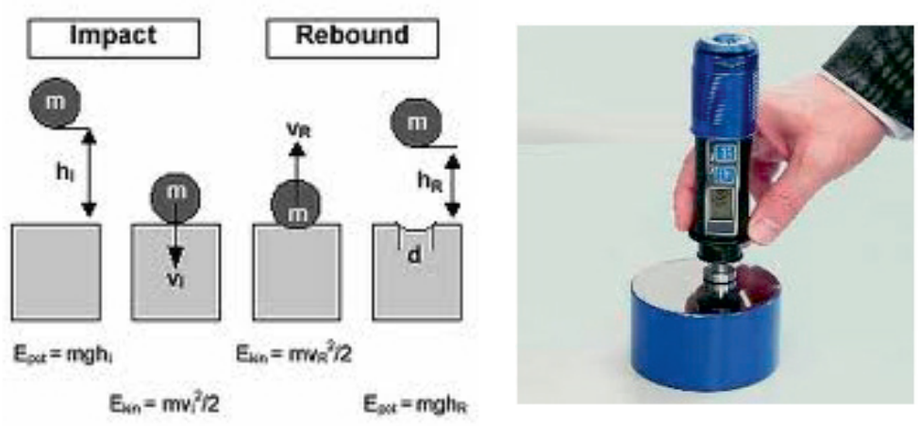


a) Kalsiyum karbonat: 3 Mohs **b)** Lincoln senti: 2,5 Mohs; Hindistan senti: 3,5 Mohs

Şekil 354. Mohs sertlik ölçüm standardı (a) ve numunesi (b)

Dinamik Sertlik

Bu yöntemde genellikle sert metal bir bilye uç, sertliği ölçülecek metal malzemenin yüzeyine belirli bir enerji (hız) ile fırlatılır ve sertlik, oluşan izin büyüklüğü ile değerlendirilir. Bazı durumlarda ise bilye ucun yüzeye çarpıp geri döndükten sonra çıktığı yükseklik malzemenin sertliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Burada bilye ile malzeme yüzeyi arasında gerçekleşecek çarpışmada malzemenin şekil değişimi ne kadar fazla ise yani malzeme ne kadar yumuşak ise enerji kaybı o kadar fazla olacaktır. Bazı uygulamalarda ise, bilye uç belirli bir enerji (hız) ile sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyine gönderilir ve malzemenin sertliği bilyenin yüzeye çarpmadan hemen önceki hız ile çarptıktan hemen sonraki hızlarının oranı ile ölçülür.



a) Ölçüm prensibi **b)** Test cihazı

Şekil 355. Dinamik sertlik ölçüm prensibi ve cihazı

Statik Sertlik

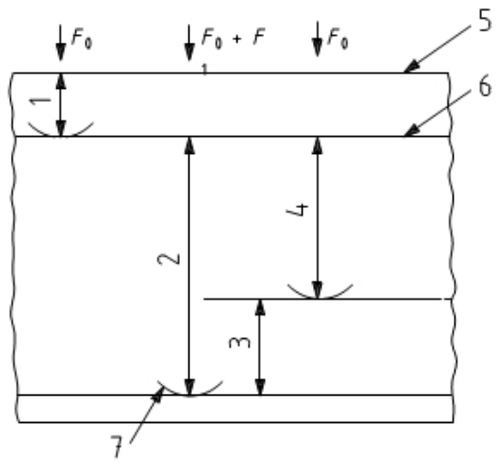
Günümüzde en çok kullanılan bu sertlik ölçme yönteminde, sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyinde, belirli bir şekle sahip ve sert malzemeden yapılmış bir uç üzerine belirli bir kuvvet uygulanarak bir deformasyon oluşturulur. Standart bir prosedür dahilinde gerçekleştirilen bu deformasyonun büyüklüğü ölçülür ve deformasyon ne kadar küçük ise sertlik o kadar büyük, deformasyon ne kadar büyük ise sertlik o kadar küçüktür. Bu yöntem ile metal ve plastik malzemelerin sertliklerinin ölçümünde çok yaygın olarak kullanılır. Metal malzemelerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılan Rockwell, Brinell, Vickers-Mikrovickers, Knoop sertlik ölçekleri ile plastik ve kauçuk malzemelerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılan Shore ve IRHD sertlik ölçekleri statik sertlik ölçümü içinde yer alır. Bu sertlik ölçekleri aynı zamanda metroloji dünyasında en çok kullanılan sertlik ölçeklerdir. Aşağıda bu sertlik ölçeklerini detaylı bir şekilde inceleyeceğiz.

Rockwell Sertliği

Rockwell sertlik ölçümü, malzemelerin deformasyonu ile gerçekleştirilen, standart metotlar ve uçlar kullanarak izler oluşturup ve bu izlerin büyüklüklerinin ölçümünü gerçekleştirerek yapılan bir sertlik ölçüm yöntemidir. Rockwell sertlik değeri ucun malzeme içine dalma derinliği ölçülerek hesaplanan bir sertlik değeridir.

Rockwell sertliği ölçüm yönteminde malzeme üzerine batıcı bir uç yardımıyla önce sabit belirli küçük bir yük (ön yük) uygulanır ve meydana gelen izin dip kısmı dalma derinliği ölçümü için başlangıç noktası kabul edilir. Yük daha yüksek belirli bir değere (toplam yük) artırılıp daha

sonra tekrar önceki yüke (ön yüke) dönülür. Ucun başlangıç noktasına göre malzeme içine dalma miktarına dalma derinliği denir. Dalma derinliği ile hesaplanan Rockwell Sertliği genellikle daha sert metallerin sertliğinin ölçülmesinde kullanılan bir ölçektir. Doğruluğunun yüksek olması, ölçümünün diğer sertlik ölçeklerine göre çok daha hızlı ve kolay olması bu ölçeğin son derece önemli olmasına ve yaygın kullanılmasına sebep olmuş ve dünyada en çok kullanılan sertlik ölçeği haline getirmiştir. Bu ölçekte ucun üzerine uygulanan kuvvetler ve bu kuvvetlere göre ucun malzeme içinde dalma derinlikleri Şekil 356'da gösterilmiştir [227].



Ucun Malzeme İçindeki Konumları:

1) Ucun F_0 ön yük (ön kuvvet) altında dalma derinliği
2) Ucun toplam kuvvet F altında dalma derinliği, plastik ve elastik deformasyon
3) Ucun ek yük kaldırıldıktan sonra ilk ön yük F_0 altında dalma derinliği
4) Malzeme yüzeyinde oluşan ve sertlik ölçümünde asıl parametre olan kalıcı (plastik) deformasyon
5) Sertliği ölçülen malzemenin yüzeyi
6) Dalma derinliğinin ölçümü için seçilen referans yüzey

Şekil 356. Rockwell sertliği ölçme prensibine göre ucun malzeme içindeki konumları

Rockwell sertlik prensibini adım adım takip edersek, sertliği ölçülecek bir malzemeye batırılacak ucun üzerine F_0 ön yükü uygulanır ve ucun belirli bir miktar malzemenin içine girmesi sağlanır, uç (1) derinliğindedir. Ön yük uygulandıktan sonra ucun bulunduğu konum, Rockwell sertliğinin belirlenmesinde kullanılan dalma derinliğinin ölçümüne referans olacak konumdur, yani dalma deriliğinin ölçümünün başlangıç noktasıdır. Daha sonra ek bir kuvvet (F_1) uygulanarak ucun malzemenin içine daha fazla batması sağlanır. Uç (2) derinliğindedir. Kuvvetin asıl olarak bu adımda malzeme üzerinde oluşturacağı plastik deformasyon miktarı önemlidir. Belirli bir süre boyunca tutulan bu kuvvet de kaldırılır ve tekrar ön yüke dönülür, uç burada (3) derinliğindedir. Ön yük kaldırılmadan ucun bulunduğu konum ölçülür. Dalma derinliği veya kuvvetin bir uç yardımıyla malzeme üzerinde oluşturacağı plastik deformasyon, ucun birinci ön yük F_0'ın uygulanmasından sonra bulunduğu konum ile ek yük F_1 uygulanıp kaldırıldıktan ve tekrar ön yük F_0'a dönüldükten sonraki ucun pozisyonu arasındaki farktır. Farklı ölçeklerde gerçekleştirilecek ölçümler için ilgili uç ve kuvvet seçimi unutulmamalıdır. Aşağıda Rockwell sertlik prensibine göre, HRC sertlik ölçeğine ait örnek bir kuvvet uygulama döngüsü mevcuttur.

Şekil 357'deki kuvvet-zaman döngüsüne karşılık gelen ucun malzeme içindeki hareketi, yol-zaman döngüsü Şekil 358'de verilmiştir [228].

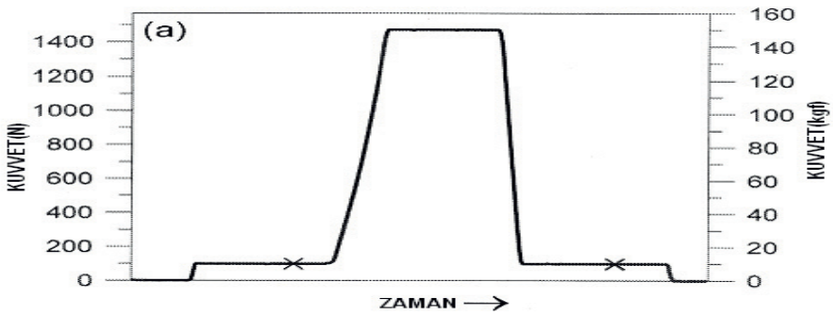
Sertlik ile dalma derinliği ters orantılı büyüklüklerdir ve aralarındaki ilişki Eşitlik (233) ile ifade edilir;

$$\text{Rockwell Sertliği} = N - \frac{h}{S} \qquad (233)$$

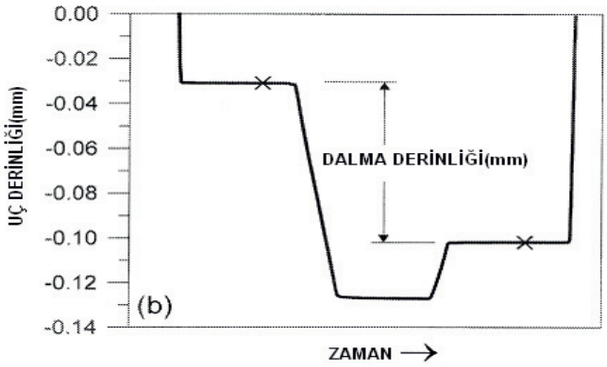
N : Sabit sayı

h : Dalma derinliği

S : Sabit sayı

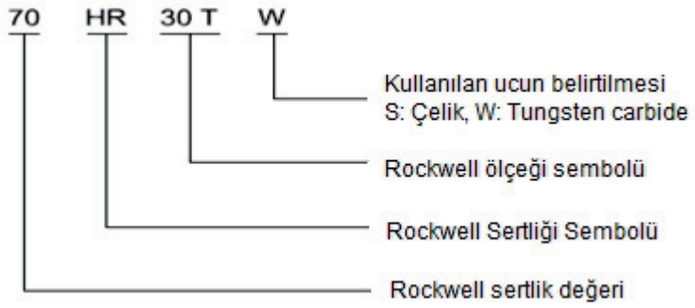


Şekil 357. Rockwell Sertlik prensibine göre HRC'ye ait kuvvet uygulama döngüsü



Şekil 358. Rockwell sertlik prensibine göre HRC'ye ait uç hareket döngüsü

Sonuç, malzemenin sertlik değerini veren bir sayıdır. Rockwell sertliği, "sertlik değeri / Rockwell sertlik sembolü / ölçek sembolü / bilye uç kullanılan sertlik ölçekleri için bilyenin malzemesini gösteren sembol" şeklinde ifade edilir. Elmas ucun kullanıldığı bir sertlik ölçeği örneği verirsek, 60 HRC sertliği, sertlik değeri (60) / Rockwell sertlik sembolü (HR) / kullanılan ölçek (C) şeklinde ifade edilir. Bilye uç kullanılan bir sertlik ölçümünde ise 70 HR30TW gibi bir ölçüm sonucu en açık haliyle aşağıdaki gibi ifade edilir [227].



Şekil 359. Rockwell sertliği ölçüm sonucunun ifadesi

Malzemelerin çeşitliliği ve bu malzemelerin kullanım farklılıkları, farklı sertlik ölçeklerini oluşturma gerekliliğini ortaya koyar. Rockwell Sertliği'nde kullanılan kuvvet değerlerine göre iki türlü sertlik ölçeği mevcuttur. Bunlar; Rockwell ve Yüzeysel Rockwell sertlik ölçekleridir. Rockwell sertlik ölçeklerinde ön yük 10 kgf (98,07 N) iken yüzeysel sertlik ölçeklerinde 3 kgf (29,42 N)'dur. Sertlik ölçeklerinin oluşturulmasında önemli rol oynayan diğer bir parametre ise malzemelerin sertliklerindeki çeşitlilik ve bu çeşitlilikten kaynaklanan farklı uç varyasyonlarıdır. Rockwell sertlik ölçeklerinde üç tür uç kullanılır: Küresel-konik elmas uç, 3,175 mm bilye uç ve 1,5785 mm bilye uç. Rockwell sertliğinde kullanılan uç ve kuvvet büyüklüklerinin farklı kombinasyonları ile oluşturulan sertlik ölçekleri, sembolleri ile kullanım alanları Tablo 35'de verilmiştir[227].

Tablo 35. Rockwell sertlik ölçekleri

Rockwell Sertlik Ölçeği	Sertlik Sembolü [1]	Kullanılan Uç	Ön Yük (N)	Ek Yük (N)	Toplam Yük (N)	Uygulama Alanı (Rockwell Sertlik Testi)
A	HRA	Elmas Uç	98,07	490,3	588,4	20HRA– 88HRA
B	HRB	1,5875 mm Bilye Uç	98,07	882,6	980,7	20HRB-100HRB
C	HRC	Elmas Uç	98,07	1373	1471	20HRC-70HRC
D	HRD	Elmas Uç	98,07	882,6	980,7	40HRD-77HRD
E	HRE	3,175 mm Bilye Uç	98,07	882,6	980,7	70HRE-100HRE
F	HRF	1,5875 mm Bilye Uç	98,07	490,3	588,4	60HRF-100HRF
G	HRG	1,5875 mm Bilye Uç	98,07	1373	1471	30HRG-94HRG
H	HRH	3,175 mm Bilye Uç	98,07	490,3	588,4	80HRH-100HRH
K	HRK	3,175 mm Bilye Uç	98,07	1373	1471	40HRK-100HRK
15N	HR15N	Elmas Uç	29,42	117,7	147,1	(70 – 94) HR15N
30N	HR30N	Elmas Uç	29,42	264,8	294,2	(42 – 86) HR30N
45N	HR45N	Elmas Uç	29,42	411,9	441,3	(20 – 77) HR45N
15T	HR15T	1,5875 mm Bilye Uç	29,42	117,7	147,1	(67 – 93) HR15T
30T	HR30T	1,5875 mm Bilye Uç	29,42	264,8	294,2	(29 – 82) HR30T
45T	HR45T	1,5875 mm Bilye Uç	29,42	411,9	441,3	(10 – 72) HR45T

[1] Bilye uç kullanılan sertlik ölçeklerinde yukarıda verilen sembollere, paslanmaz çelik bilye kullanıldığında “S”, sertleştirilmiş metal (tungsten karbid) kullanıldığında ise “W” harfleri eklenir.

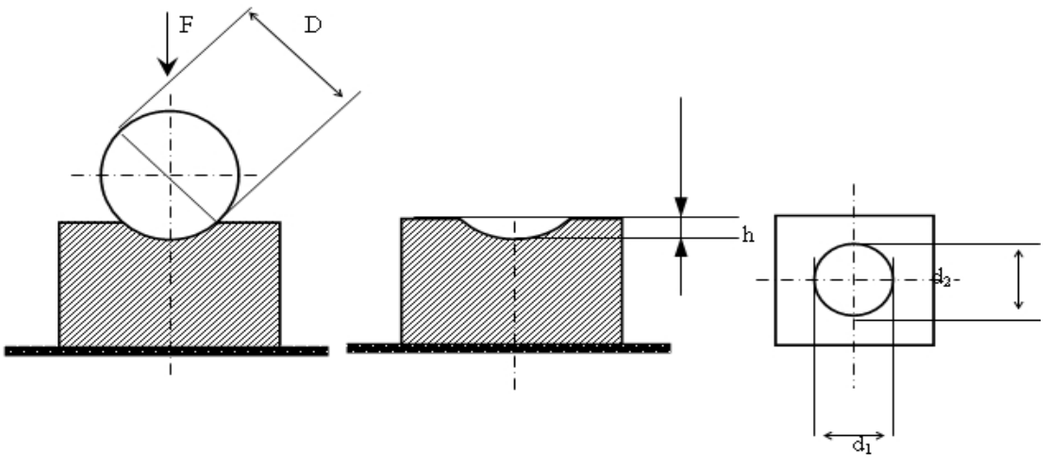
Tablo 35'de ifade edilen Rockwell sertlik ölçeklerinin hesaplama yöntemleri de farklı olabilir. Ölçeklere göre Rockwell sertliği hesaplamaları ve birimler tablosu Tablo 36'da verilmiştir [227].

Tablo 36. Rockwell sertlik ölçekleri hesaplamaları ve birimleri

Sembol	Açıklaması	Birim
F_0	Ön yük	N
F_1	Ek yük	N
F	Toplam yük	N
S	Ölçek birimi, ölçeğe bağlıdır	mm
N	Ölçek birimi cinsinden adedi	
h	Ek yükün kaldırılmasından sonra ön yük altında oluşan izin kalıcı derinliği	mm
HRA HRC HRD	$\text{Rockwell Sertliği} = 100 - \frac{h}{0{,}002}$	
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	$\text{Rockwell Sertliği} = 130 - \frac{h}{0{,}002}$	
HRN HRT	$\text{Rockwell Sertliği} = 100 - \frac{h}{0{,}001}$	

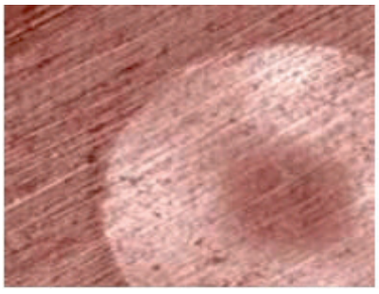
Brinell Sertliği

Brinell sertlik ölçümü, bir malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, belirli çaptaki sert malzemeden yapılmış bir bilye yardımıyla belirli bir süre uygulanmasından ve sonuç olarak meydana gelen izin çapının ölçülmesinden ibarettir. Brinell sertlik değeri uygulanan kuvvetin, oluşan izin küresel yüzey alanına oranıdır. Küresel yüzey alanı da izin ölçülen ortalama çapı ile küresel (bilye) ucun çapından faydalanılarak bulunur.



Şekil 360. Brinell sertlik ölçüm prensibi ve meydana gelen izin görüntüsü

Şekil 360'da görüldüğü gibi, belirli çapta sert metal (tungsten karbür) bilye üzerine belirli bir kuvvet belirli bir hızla ve belirli bir zaman süresi boyunca uygulanır ve malzeme yüzeyinde küresel bir deformasyon oluşturulur. Brinell sertliği ölçme prensibine göre oluşan deformasyonun küresel (gerçek) alanı hesaplanır. Bu deformasyonun bulunması için yuvarlak şekilli izin birbirine dik en az iki çapı ölçülür ve bu ölçümlerin ortalaması Brinell formülünde yerine koyulur. Bu izlerin ölçümü genellikle ölçekli bir mikroskop sistemi ile gerçekleştirilir. Kullanıcının etkisini azaltmak amacıyla son zamanlarda otomatik ölçüm sistemleri de geliştirilmiştir. Şekil 361'de Brinell izinin mikroskoptaki görüntüsü mevcuttur.



Şekil 361. Brinell sertlik ölçümü sonucunda meydana gelen iz görüntüsü

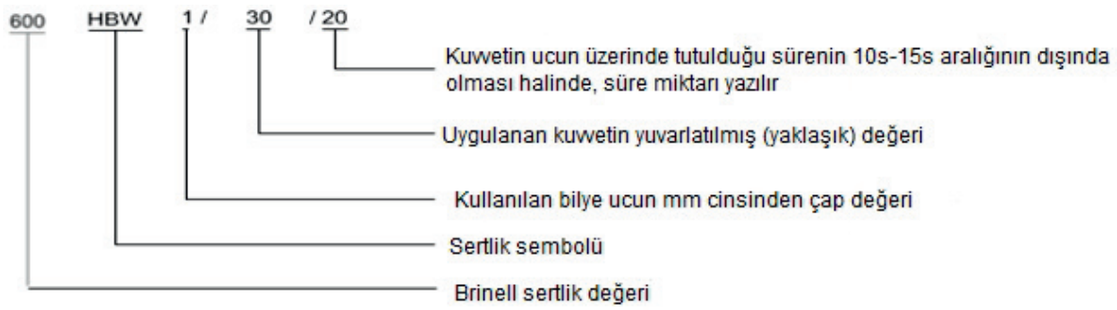
Sertlik ile izin ortalama çapı ters orantılı büyüklüklerdir ve aralarındaki ilişki Eşitlik (234) ile ifade edilir;

$$HBW = \frac{1}{g_n}\frac{\text{kuvvet}}{\text{izin yüzey alanı}} = 0{,}102\,\frac{2F}{\pi D\left(D-\sqrt{D^2-d^2}\right)} \qquad (234)$$

HBW : Brinell sertlik değeri
F : Uygulanan kuvvet değeri [N]
D : Bilye çapı [mm]
d : Ölçülen iz çapı [mm]
π : Sabit sayı

Sonuç, malzemenin Brinell sertlik değerini veren bir sayıdır.

Brinell sertliği, sertlik değeri / Brinell sertlik sembolü ve bilyenin malzemesini gösteren sembol / mm biriminde bilye çapı / kgf biriminde kuvvet / (10 – 15) saniyenin dışında ise kuvvetin uç üzerinde tutulma zamanı şeklinde ifade edilir. Mesela 600 / HBW / 1 / 30 / 20 ifadesi "30 kgf yükün 1 mm çaplı bilyeye 20 saniye uygulanması sonucu elde edilen Brinell sertlik değeri 600 olarak bulunmuştur" anlamında ifade edilir. Bu konuda daha açıklayıcı şema Şekil 362'de verilmiştir [229].



Şekil 362. Brinell Sertliği Ölçüm Sonucunun İfadesi

Malzemelerin çeşitliliği ve bu malzemelerin kullanım farklılıkları, farklı sertlik ölçekleri oluşturma gerekliliğini ortaya koymuştur. Tablo 37'de bütün Brinell sertlik ölçekleri verilmektedir [229].

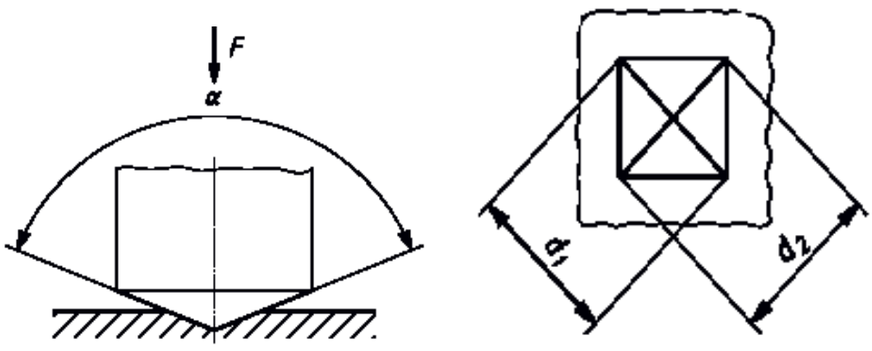
Tablo 37. Brinell sertlik ölçekleri

Sertlik Sembolü	Bilye Çapı	Test Kuvveti Nominal Değeri
HBW 10/3 000	10 mm	29,42 kN
HBW 10/1 500	10 mm	14,71 kN
HBW 10/1 000	10 mm	9,807 kN
HBW 10/500	10 mm	4,903 kN
HBW 10/250	10 mm	2,452 kN
HBW 10/100	10 mm	980,7 N
HBW 5/750	5 mm	7,355 kN
HBW 5/250	5 mm	2,452 kN
HBW 5/125	5 mm	1,226 kN
HBW 5/62,5	5 mm	612,9 N
HBW 5/25	5 mm	245,2 N
HBW 2,5/187,5	2,5 mm	1,839 kN
HBW 2,5/62,5	2,5 mm	612,9 N
HBW 2,5/31,25	2,5 mm	306,5 N
HBW 2,5/15,625	2,5 mm	153,2 N
HBW 2,5/6,25	2,5 mm	61,29 N
HBW 1/30	1 mm	294,2 N
HBW 1/10	1 mm	98,07 N
HBW 1/5	1 mm	49,03 N
HBW 1/2,5	1 mm	24,52 N
HBW 1/1	1 mm	9,807 N

Brinell Sertliği'nde kullanılan kuvvet değerleri 1 kgf ile 3000 kgf arasındadır. Birçok kuvvet değeri kullanılmakla birlikte en çok kullanılan kuvvet değerleri 62,5 kgf ve 187,5 kgf değerleridir. Brinell sertlik ölçeklerinde farklı çaplarda Tungsten karbür (sertleştirilmiş metal) bilyeler kullanılır. Bu bilyelerin çapları 1 mm, 2,5 mm, 5 mm, 10 mm'dir.

Vickers Sertliği

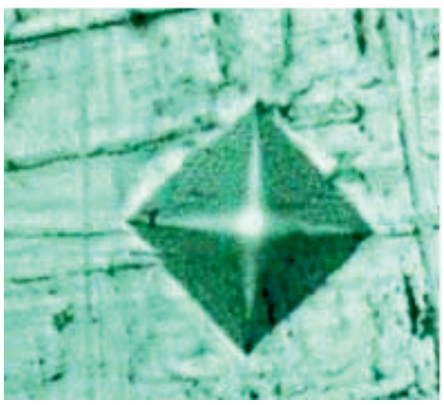
Vickers sertlik ölçümü, bir malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, kare tabanlı piramit elmas bir uca belirli bir süre uygulanmasından ve sonuç olarak meydana gelen izin ortalama köşegen uzunluğunun ölçülmesinden ibarettir. Vickers sertlik değeri, uygulanan kuvvetin oluşan izin piramitsel (gerçek) yüzey alanına oranıdır. Piramit yüzey alanı da izin ölçülen ortalama köşegen uzunluğundan faydalanılarak bulunur. Vickers sertliğinin ölçüm prensibi ile ilgili olarak iz oluşturma yöntemi ve izin köşegen büyüklüğünün ölçülmesi ile ilgili şema Şekil 363'deki gibidir [230].



a) b)

Şekil 363. Vickers sertliği ölçüm için iz oluşturma (a) ve iz ölçümü (b)

Vickers sertliğinin ölçüm prensibi gereği elmas uç üzerine kuvvet uygulanır. Elmas uç kare tabanlı olduğu için oluşan izin şekli de karedir. Oluşan deformasyonun büyüklüğünün ölçülmesi kare şekilli izin köşegenlerinin ölçümüyle gerçekleştirilir. İki adet köşegen uzunluğunun ortalaması Vickers sertlik hesaplama formülünde yerine konulur ve Vickers sertlik değeri bulunur. Şekil 364'de bir Vickers sertlik izinin mikroskoptaki görüntüsü verilmektedir.



Şekil 364. Vickers sertlik ölçümü sonucunda meydana gelen iz görüntüsü

Oluşturulan izin ortalama köşegen uzunluğu, d ile sertlik değeri arasındaki ilişki Eşitlik (235) ile ifade edilmiştir [230]. Burada d izin yüzey alanını bulmak için kullanılmaktadır.

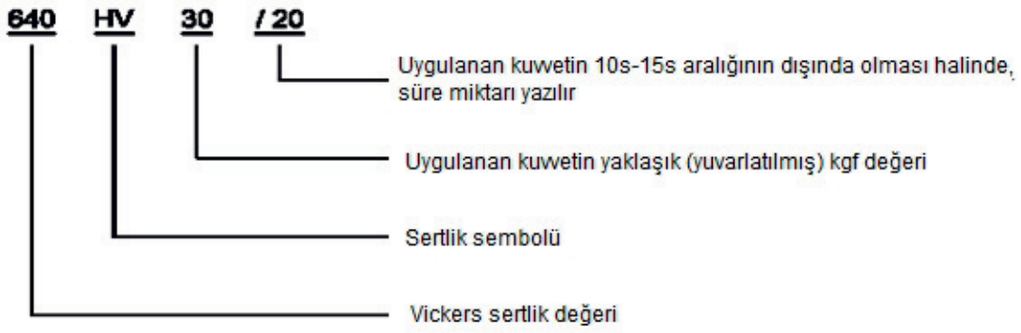
$$HV = \frac{1}{g_n}\frac{\text{kuvvet}}{\text{izin yüzey alanı}} = 0{,}102\frac{2F\sin\frac{136°}{2}}{d^2} = 0{,}1891\frac{F}{d^2} \quad (235)$$

HV : Vickers sertliği

F : Uygulanan kuvvet [N]

d : Ölçülen izin köşegen uzunluğu [mm]

Vickers sertliği, “sertlik değeri / Vickers sertlik sembolü / ölçeğe ait kuvvetin kgf karşılığı / (10 - 15) saniyenin dışında ise zaman” şeklinde ifade edilir. Mesela 600 / HV / 30 / 20 ifadesi “30 kgf yükün elmas uca 20 saniye uygulanması sonucu elde edilen Vickers değeri 600 olarak bulunmuştur” anlamında ifade edilir [230]. Bu konuda daha açıklayıcı şema Şekil 365’de verilmiştir.



Şekil 365. Vickers sertliği ölçüm sonucunun ifadesi

Diğer sertlik ölçeklerinde olduğu gibi Vickers sertlik ölçeğinde de farklı kuvvetler kullanılarak farklı sertlik ölçekleri oluşturulur. Uç ise bütün ölçekler için aynıdır fakat Mikrovickers ölçeklerinde kullanılan piramit elmas ucun daha hassas olmasına dikkat edilir. Vickers sertlik ölçeklerinde kullanılan kuvvetler 10 gf ile 100 kgf arasında değişir, uç ise hep aynı olup 136º tepe açılı kare tabanlı piramit elmas uçtur. Tablo 38’de Vickers sertlik ölçekleri verilmektedir [230].

Tablo 38. Vickers sertlik ölçekleri

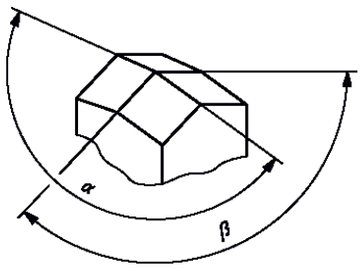
Sertlik Testi [1)]		Düşük Yük Sertlik Testi		Mikrosertlik Testi	
Sertlik Sembolü	Nominal Kuvvet Değeri F (N)	Sertlik Sembolü	Nominal Kuvvet Değeri F (N)	Sertlik Sembolü	Nominal Kuvvet Değeri F (N)
HV5	49,03	HV0,2	1,961	HV0,01	0,098 07
HV10	98,07	HV0,3	2,942	HV0,015	0,147
HV20	196,1	HV0,5	4,903	HV0,02	0,196 1
HV30	294,2	HV1	9,807	HV0,025	0,245 2
HV50	490,3	HV2	19,61	HV0,05	0,490 3
HV100	980,7	HV3	29,42	HV0,1	0,980 7

1) 980,7 N’dan büyük nominal kuvvet değeri kullanılabilir.

Knoop Sertliği

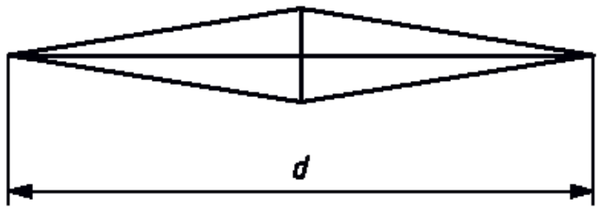
İnce tabakaların sertlik ölçümünde kullanılan ve Mikrovickers ile birlikte mikrosertlik ölçeğini oluşturan Knoop sertliği, metal malzemelerin sertliğinin ölçümünde en az kullanılan sertlik ölçeğidir. Mikrovicerks sertlik ölçeğinde kullanılan kuvvet değerleri kullanılır. Kare tabanlı piramit elmas uç yerine rhombic şekilli elmas uç kullanılır.

Knoop sertlik ölçümü, bir malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, rhombic şekilli elmas uç yardımıyla belirli bir süre uygulanması ve sonuç olarak meydana gelen eşkenar dörtgen şekilli izin uzun köşegen uzunluğunun ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Knoop sertlik değeri uygulanan kuvvetin oluşan piramit izin gerçek yüzey alanına oranıdır. Rhombic yüzey alanı da izin ölçülen uzun köşegen uzunluğundan faydalanılarak bulunur. Aşağıda Knoop sertlik ölçümünde kullanılan ucu görebilirsiniz [231].



Şekil 366. Knoop sertliği elmas ucunun şekli

Knoop sertliğinin ölçüm prensibi ile ilgili olarak iz oluşturma yöntemi izin çap büyüklüğünün ölçülmesi ile ilgili şema Şekil 367'de mevcuttur [231].



Şekil 367. Knoop Sertlik ölçümü sonucunda meydana gelen iz görüntüsü

İz oluşturulduktan sonra sertlik ölçme cihazının iz ölçme sistemiyle rhombic şekilli izin uzun köşegen uzunluğu ölçülür ve uygulanan kuvvet değeri ile Knoop sertliği Eşitlik (236) kullanılarak hesaplanır:

$$HK = \text{sabit}\ \frac{\text{kuvvet}}{\text{izin yüzey alanı}} = 0{,}102\ \frac{F}{cd^2} = 1{,}451\ \frac{F}{d^2} \qquad (236)$$

HK : Knoop sertlik değeri

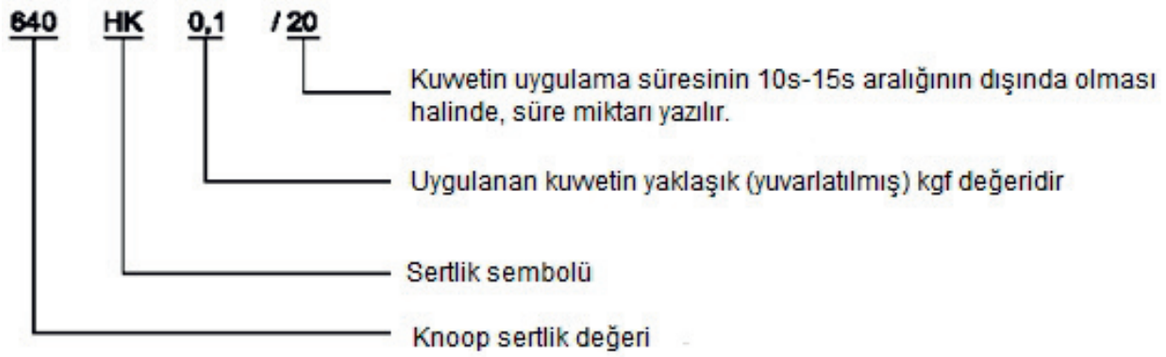
F : Uygulanan kuvvet [N]

c : Sabit

d : Ölçülen izin uzun köşegen uzunluğu [mm]

Sonuç, malzemenin Knoop sertlik değerini veren bir sayıdır.

Knoop sertliği, ”sertlik değeri / Knoop sertlik sembolü / ölçeğe ait kuvvetin kgf karşılığı / (10 - 15) saniyenin dışında ise zaman” şeklinde ifade edilir. Mesela 640 / HK / 0,1 / 20 ifadesi “0,1 kgf yükün elmas uca 20 saniye uygulanması sonucu elde edilen Knoop değeri 640 olarak bulunmuştur” anlamında ifade edilir [231]. Burada da verilen bilgiler, ulaşılan sertlik değerinin hangi koşullar altında yapılan ölçüm sonucunda bulunduğunu ifade eder. Süre standardının dışında kalındığı bazı durumlarda ise bu süre sertlik notasyonuna eklenir ve uyulan süre ne ise sonuç ifadesinde gösterilir. Standart sürenin dışına çıkıldığı durumlar için örnek olabilecek şematik bir gösterim Şekil 368’de verilmiştir.



Şekil 368. Knoop sertliği ölçüm sonucunun ifadesi

Knoop sertlik ölçekleri farklı kuvvetler kullanarak oluşturulur. Burada kullanılan uç hep aynı olup rhombic şekilli elmas uçtur. Tablo 39’da Knoop sertlik ölçeklerini verilmektedir.

Tablo 39. Knoop sertlik ölçekleri

Sertlik sembolü	Nominal kuvvet değeri F (N)	F (kgf)	Sertlik sembolü	Nominal kuvvet değeri F (N)	F (kgf)
HK0,01	0,09807	0,010	HK0,2	1,961	0,200
HK0,02	0,1961	0,020	HK0,3	2,942	0,300
HK0,025	0,2452	0,025	HK0,5	4,903	0,500
HK0,05	0,4903	0,050	HK1	9,807	1,000
HK0,1	0,9807	0,100	HK2	19,614	2,000

Shore Sertliği

Shore sertliği, metal malzemelerin sertliğinin ölçümünde olduğu gibi, belirli şekillerde batıcı uçları belirli yük altında belirli bir süre tutmak kaydıyla ucun malzemeye batma miktarı ile hesaplanır. Burada sertlik dalma derinliği ile ters orantılıdır.

En çok kullanılan iki tip Shore ölçeği vardır; Shore-A ve Shore-D. Shore-A nisbeten yumuşak plastik ve ebonit malzemelerin sertlik ölçümleri için kullanılırken, Shore-D ise daha sert malzemelerin sertlik ölçümlerinde kullanılır. Bu durometrelerin bileşenleri ve genel özellikleri aşağıdaki gibidir[232]:

- **Basma Tablası:** Sertlik ölçümü esnasında numuneye basan belirli çapta olan metal plakadır.
- **Batıcı Uç:** Ölçeğe göre geometrik yapıda bulunan sertleştirilmiş çelikten yapılmış ve malzemeye batma miktarına göre sertlik ölçümü gerçekleştirilen modüldür.
- **Gösterge Cihazı:** Sertlik değerlerini ucun dalma derinliğine göre ölçecek bu sistem 0 - 100 sertlik ölçeğini (0 - 2,5) mm aralığında okuyacak şekilde ölçeklendirilmiş olması gerekir.
- **Yay Elemanı:** Uygulanan kuvvet ile okunan sertlik değerleri arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi olmalıdır;

1. A tipi durometreler (Shore-A):

$$F = 550 + 75\ H_A \tag{237}$$

2. D tipi durometreler (Shore-D):

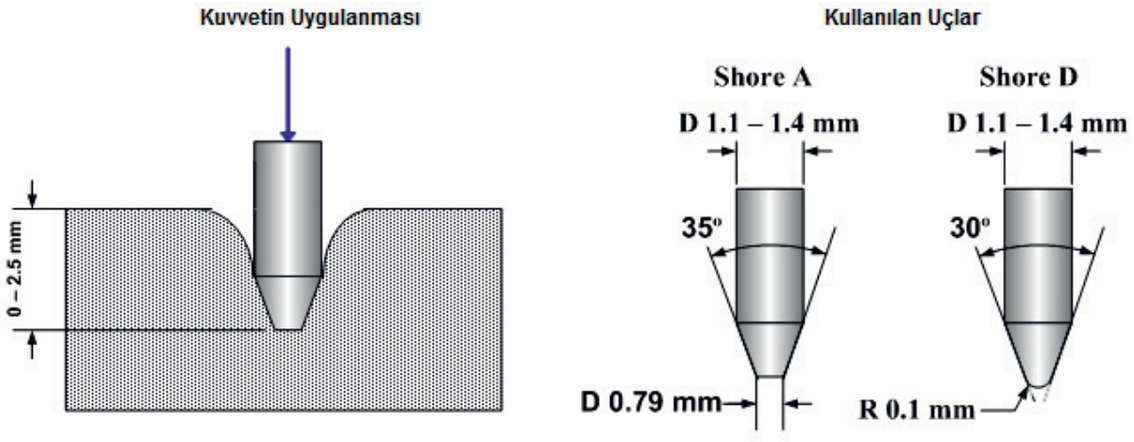
$$F = 445\ H_D \tag{238}$$

F : Uygulanan kuvvet [mN]

H_A : Shore-A Sertlik değeri

H_D : Shore-D Sertlik değeri

Şekil 369'da Shore sertliği ölçüm prensibinin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 369. Shore sertlik ölçüm prensibi

IRHD Sertliği

IRHD (International rubber hardness degree) sertlik ölçüm prensibi, küçük bilye ucun kauçuk içinde değeri küçük bir ön yük ile daha büyük bir kuvvet değeri uygulanmasıyla oluşan dalma miktarı ile ölçülen ve bununla ters orantılı olan bir sertlik ölçüm yöntemidir. Malzemelerin sertliklerine göre oluşturulmuş 4 adet alt ölçeği bulunur. Bunlar; N metodu (normal test), H metodu (yüksek sertlik testi), L metodu (düşük sertlik testi), M metodundan (mikro test) oluşur. Şekil 370'de IRHD sertlik ölçüm prensibinin bir şeması görülmektedir[233].



Şekil 370. IRHD sertlik ölçme cihazı

Sertlik Standardı Makineleri

Sertlik ölçeklerinin yüksek doğruluklarla gerçekleştirilmesi için üretilmiş ve bir ölçeği oluşturan parametreler olan kuvvet uygulama sistemi, sertlik ucu ve iz ölçme sistemini kapsayan ve çeşitli test döngülerine göre sertlik ölçümü gerçekleştirebilen sistemlerdir. Bu sistemler ülkemizde kullanılan sertlik test cihazlarının doğrulanmasında kullanılan sertlik referans bloklarının kalibrasyonunda kullanılır. Sertlik standardı makinelerinde oluşturulan sertlik ölçekleri en doğru (belirsizliği en düşük) ölçeklerdir. Bunun gerçekleşebilmesi için, bir ölçeği oluşturan bileşenlerin en düşük belirsizlikle oluşturulması gerekir. Mesela kuvvet, en doğru olarak yerçekimi kuvveti etkisinde olan kütleler ile oluşturulur. Ölü ağırlık dediğimiz bu kuvvet oluşturma yöntemi bu cihazlarda kuvvet kaynağı olarak kullanılabilir. Kuvvet 1×10^{-4} ile 5×10^{-3} belirsizlik değerleri ile uygulanabilir.

İz ölçme sistemi Brinell ve Vickers sertlik ölçekleri için ayrı bir sistem olup bu sistemlerin belirsizlikleri 0,1 µm seviyelerinde olabilir. Eğer Rockwell sertliğinde olduğu gibi dalma derinliği ölçümü gerçekleştirilecekse lazer enterferometre optik sistemi kullanlmakta ve malzeme üzerinde oluşturulan plastik deformasyonun ölçümü 0,2 µm belirsizlikle en doğru ve hassas bir şekilde gerçekleştrilebilir.

Sonuç büyüklük olarak Rockwell Sertliğinde 0,3 Rockwell, Brinell ve Vickers Sertliklerinde % 1 belirsizliklerle sertlik ölçümü yapmak mümkün olmaktadır. UME'nin Sertlik Standardı Makineleri Şekil 371'de görülmektedir.



a)Rockwell sertlik standardı makinesi



b)Brinell-Vickers sertlik standardı makinesi

Şekil 371. UME sertlik standardı makineleri

Sertlik Ölçme Cihazları

Sertlik ölçüm (test) cihazları, test laboratuvarlarında sertlik standardı makineleri ile benzer metotlarla sertlik ölçümü yapmak için kullanılır. Test cihazlarında da sertlik ölçeğini oluşturan uç, kuvvet uygulama sistemi, iz ölçme sistemi ve test döngüsü mevcuttur. Bu bileşenlerin de kalibrasyonlarının yapılması ve ulusal standartlara izlenebilirliklerinin sağlanması gerekir. Test cihazlarının makinelerden farkı sadece tolerans ve belirsizlik değerleridir. Sertlik standardı makinelerinde kuvvet hata toleransı % 0,1 [234][235][236][237] iken test cihazlarında % 1'dir [238][239][240][241]. Belirsizliği daha yüksek olan bu cihazlarda kuvvet ölü ağırlıklarla oluşturulabileceği gibi, kuvvet dönüştürücü ve servo-motor sistemi ile veya manivela-ölü ağırlık sistemiyle de gerçekleştirilebilir. Ucun geometrisi ve malzemesi aynı olup belirsizlik değerleri fazladır. Aynı durum iz ölçme sistemi için de geçerlidir. Şekil 372'de çeşitli sertlik test cihazları görülmektedir.



a)Rockwell sertlik test cihazı



b)Brinell sertlik test cihazı



c)Vickers sertlik test cihazı



d)Mikrovickers sertlik test cihazı

Şekil 372. Sertlik test cihazları

Sertlik Referans Blok Kalibrasyonu

Sertlik referans blok kalibrasyonu, uluslararası kabul gören ve Avrupa normu olarak adlandırılan standartlarda ifade edilen yöntem ve prosedürlere göre yapılır. Kalibrasyonu yapılan bloklar ile ilgili olarak iki önemli özelliğin değerlendirilmesi gerekir: Birincisi sertlik referans bloklarının sertlik değerleri, ikincisi ise bloklarının yüzey homojenlikleri. Bu iki özellik blokların yüzeyleri üzerinde alınan 5 adet sertlik ölçümü ile gerçekleştirilir. Bu 5 adet sertlik değerinin ortalaması bloğun sertlik değerini, en büyük sertlik değeri ile en küçüğü arasındaki fark ise homojenliği verir. Bu uygulama bütün sertlik ölçekleri için geçerlidir.

Kalibrasyonlar Rockwell sertliği için EN ISO 6508-1 ve 6508-3, Brinell sertliği için EN ISO 6506-1 ve 6506-3, Vickers Sertliği için EN ISO 6507-1 ve 6507-3, Knoop sertliği için EN ISO 4545-1 ve 4545-3 standartlarında belirtilen şartlar altında ve ifade edilen yöntem ve prosedürlere göre gerçekleştirilir. Şekil 373'de çeşitli ölçeklere ait sertlik referans blokları görülmektedir.



Şekil 373. Sertlik referans blokları

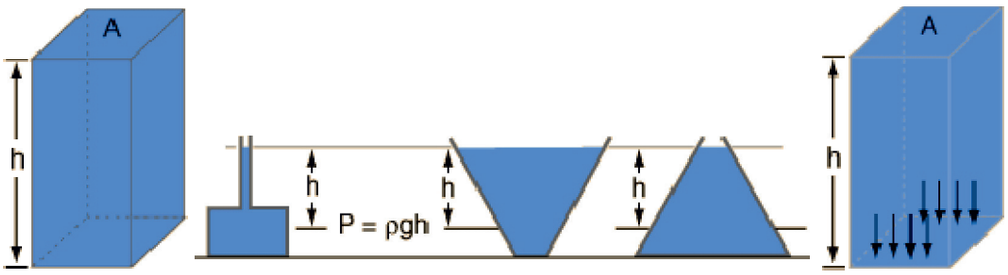
7.5.7 BASINÇ

7.5.7.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Basınç, birim alana etkiyen dikey kuvvet ya da kapalı kap içerisindeki bir akışkanın herhangi bir noktasındaki gerilim olarak tanımlanır. Basınç teorik olarak p=F/A [242] formülüyle tanımlanır. Burada A, birim alanı, F kuvveti göstermektedir.

Kinetik teoriye göre sıvılar, içinde bulundukları kabın çeperlerinin yüzeylerine dik olarak kuvvet uygularlar. Bir sıvının içindeki 1 cm^2'lik yüzeye o sıvının yaptığı etki, hidrostatik basınç olarak adlandırılır. Statik akışkan tarafından oluşturulan basınç değeri sadece sıvının yoğunluğuna, sıvı derinliğine ve yerçekimi ivmesine bağlıdır.

Yoğunluğu bilinen bir sıvının, belli bir derinlikte, kabın belli bir yüzey alanına uyguladığı kuvvet, F=S×h×d formülüne göre bulunur. F; kuvveti, S; yüzey alanı, h; sıvının yüzeyine olan yüksekliği, d; sıvının özgül ağırlığını gösterir. Aynı derinlikteki tüm noktalarda basınç aynıdır. Gazlar da sıvılar gibi, içinde bulundukları kabın çeperlerine basınç uygular. Bu basınç da her noktada eşittir.



Şekil 374. Aynı derinlikte tüm noktalarda basınç aynıdır

Basınç birimi Pascal'ı aşağıdaki şekilde elde edebiliriz:

Uluslararası Birimler Sistemi (SI) , Kütle ve Büyüklükler Genel Konferansı'nca (CGPM – General Conference on Weights and Measures) kabul edilmiş 7 temel büyüklüğe dayanır. Bu temel büyüklükler ve SI'da kullanılan birimleri, uzunluk (metre), kütle (kilogram), zaman (saniye), elektrik akımı (amper), termodinamik sıcaklık (Kelvin), madde miktarı (mol) ve ışık şiddeti (kandela) olarak sıralanabilir.

Basınç, temel bir büyüklük olmayıp, uzunluk, kütle ve zamandan türetilmiş bir büyüklüktür. SI'da (Uluslararası Birimler Sistemi basınç birimi Pascal'dır [242]. Basıncı, basınç ölçmenin iki farklı yöntemiyle açıklayacak olursak,

1. Birim alana etki eden dikey kuvvet;

$$\text{Basınç} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Alan}} = \frac{\text{Kütle} \times \text{İvme}}{\text{Alan}} = \frac{(\text{Kütle}) \times (\frac{\text{Uzunluk}}{\text{Zaman}^2})}{\text{Uzunluk}^2} = \frac{\text{Kütle}}{(\text{Uzunluk}) \times (\text{Zaman}^2)}$$

2. Sıvı sütunu

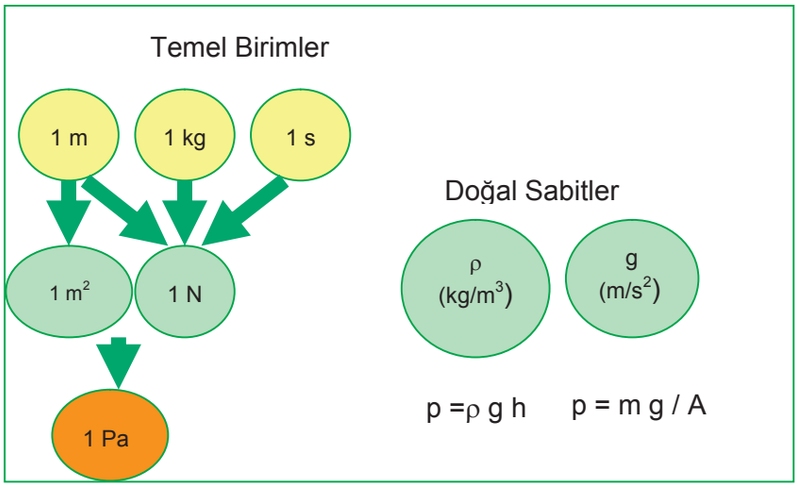
$$\text{Basınç} = \text{Yoğunluk} \times \text{İvme} \times \text{Yükseklik} = \frac{\text{Kütle}}{\text{Uzunluk}^3} \times \frac{\text{Uzunluk}}{\text{Zaman}^2} \times \text{Uzunluk} = \frac{\text{Kütle}}{\text{Uzunluk} \times \text{Zaman}^2}$$

$$p = \frac{F}{A}$$

$$p = \frac{m\ g}{A}$$

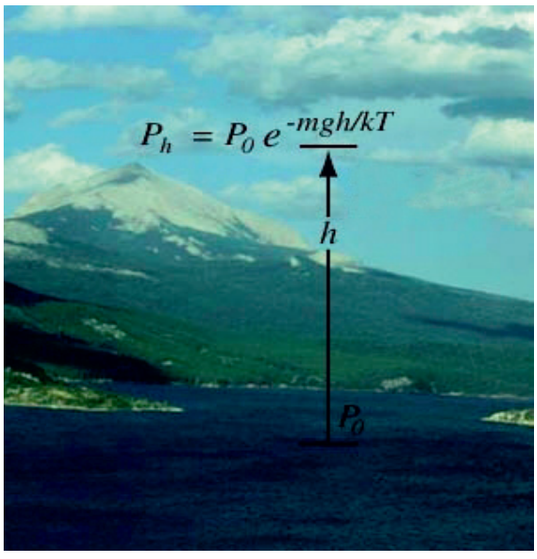
$$p = \frac{kg\ m/s^2}{m^2} = \frac{Newton}{m^2} = \frac{kg}{m\ s^2} = Pascal$$

Basınç ayrıca cm^2'ye düşen dyne ya da kilogram olarak da ölçülür. Atmosfer, bar, psi (lb/in^2), Torr (mmHg), inHg, mmH_2O, inH_2O da bugün sıklıkla kullanılmakta olan diğer basınç birimleridir.



Şekil 375. Basınç birimi türetilmiş bir birimdir [242]

Atmosfer, bar, psi (lb/in^2), Torr (mmHg), inHg, mmH_2O, inH_2O da bugün sıklıkla kullanılmakta olan diğer basınç birimleridir.



Şekil 376. Barometrik basınç ve irtifa [243]

Havanın dünyanın yerçekimi etkisiyle yüzeye dik olarak uyguladığı kuvvetle oluşan basınca atmosfer basıncı denir. Atmosfer basıncı, havayla tüm yönlere eşit şekilde iletilir. Yüzey üzerindeki havanın yoğunluğundaki sıcaklık ve global iklim çeşitliliği gibi etkenlerle meydana gelen değişim, yüzeye etkiyen kuvvetin dolayısıyla atmosfer basıncının sürekli olarak değişmesine neden olur. Bu bilimsel veriye dayanılarak atmosfer basıncı ölçülmesi yoluyla

meteorolojik tahminlerde bulunulur. Genel anlamda ifade edecek olursak, atmosfer basıncının üzerindeki basınç değerlerinde hava açık, altındaki basınç değerlerinde ise kapalı ve yağmurludur. Deniz seviyesinden yükseklere çıkıldıkça atmosfer basıncı düşer. Bir dağın zirvesinde, üzerimizde kalan hava kütlesinin azaldığını ve dünyanın merkezinden uzaklaşarak yerçekimi ivmesinin de azaldığını hesaba katarsak, burada atmosfer basıncının azalacağı sonucunu çıkarabiliriz. Atmosfer basıncının birimi Atmosfer (Atm)'dir. 1 standart atmosfer 101325 Pa olarak tanımlanır. Açık hava basıncı barometrelerle ölçülür.

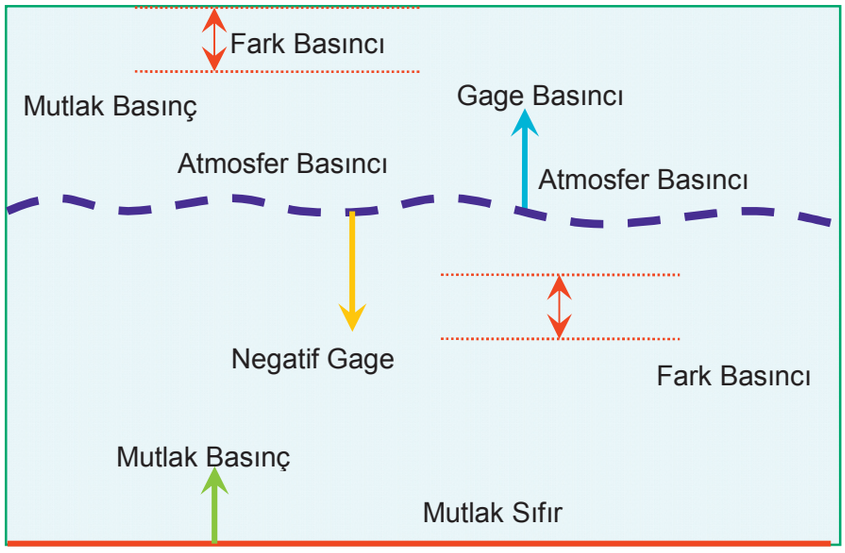
Referans olarak alınan noktaya göre basınç ölçümleri beş değişik şekilde gerçekleştirilir. Bunlar;

- Gauge (Bağıl) Basıncı
- Absolute (Mutlak) Basınç
- Negatif Basınç
- Fark Basıncı
- Atmosfer basıncı

olarak sınıflandırılabilir. Bu ölçümleri kısaca açıklayacak olursak:

- **Mutlak basınç ölçümü:** (Mutlak) vakum referans alınarak yapılan ölçüm.
- **Atmosfer basıncı ölçümü:** (Mutlak) vakum referans alınarak ortam hava basıncının ölçümü.
- **Gauge (bağıl) basınç ölçümü:** Atmosfer basıncı referans alınarak, yapılan basınç ölçümü.
- **Negatif gage basınç ölçümü:** Atmosfer basıncı referans alınarak, atmosfer basıncı altında yapılan basınç ölçümü.
- **Fark basıncı ölçümü:** Bilinmeyen (herhangi) iki basınç arasında yapılan basınç ölçümüdür.

Şekil 377'de basınç ölçüm modları gösterilmiştir.



Şekil 377. Basınç ölçüm modlarının şematik gösterimi [244]

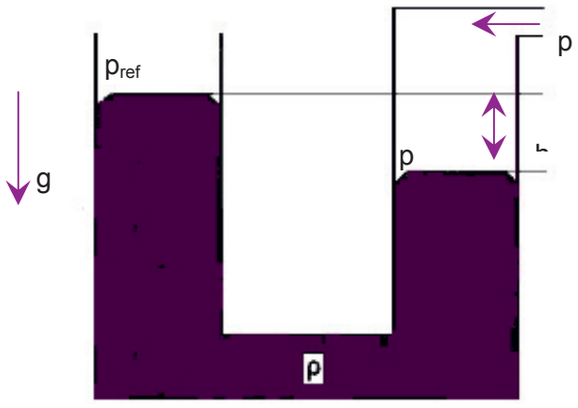
7.5.7.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Basınç ölçüm standartları, dayandığı ölçüm metoduna göre birincil ve ikincil olmak üzere iki şekilde sınıflandırılabilir. Birincil standart, belirli bir mahaldeki en yüksek metrolojik vasfa sahiptir. Birincil standartlar aynı birimin başka bir standardına karşı kalibre edilemezler, ancak sistemin uzunluk veya sıcaklıkla ilgili birimlerinin kalibre edilebilirliği mümkündür. Birincil standart tasarımı, ölçülecek büyüklük ile ona ait bileşenlerin ölçümleriyle ilişkili olarak çok iyi tanımlanmış fiziksel yasalar üstüne kurulmalıdır. Örneğin, standarda uygulanan basınç ile uzunluk, sıcaklık, kütle, zaman gibi ölçülecek bileşenlerinin arasındaki ilişki bilinmelidir. Birincil standardın belirsizlik analizi, ölçümün çevreden gelen etkilere karşı duyarlılığı ve ona ait bileşenlerin ölçümlerinin belirsizliğinin bilinmesi gibi bilgileri içerir.

İkincil standart ise, değeri bir birincil standart ile karşılaştırılarak belirlenen standarttır. İkincil standardın belirsizliği, kendisinin kalibre edildiği birincil standardın belirsizliğinden her zaman daha büyük olacaktır. Pistonlu basınç ölçer gibi cihazlar, hem birincil hem de ikincil standart olarak kullanılabilirler. Bazı transfer standartlarının kalibre edildikleri birincil standartlardan daha üstün bir kararlılığa sahip olmaları mümkün veya yaygın olabilir. Bu durumlarda transfer standartları, birincil standartların kararlılıklarını kontrol etmek amacıyla kullanılabilirler. Transfer veya kontrol standardının tekrarlanmış kalibrasyonları, birincil ve kontrol standardı arasındaki farkın beklenen sınırlar içerisinde olup olmadığının belirlenmesi amacıyla gözlenmelidir. Önemli değişiklikler, birincil ve/veya kontrol standardının yanlış çalıştığının ya da tespit edilemeyen çevresel etkinin göstergesi olabilir. Basınç ölçerler ve standartlar kendilerine özgü doğruluk içerisinde ve ölçülen değerler de basıncın mutlak ölçümüne veya birincil standarda izlenebilir olmalıdır.

Birincil Seviye Basınç Standartları

Bu grup altında ilk olarak **sıvı sütunlu basınç ölçerleri** sayabiliriz. Sıvılı manometreler ve pistonlu basınç ölçerler gibi standartların bir çok türü araştırma çalışmalarında ve basınç ölçümlerinde kullanılır. Sıvılı manometrelerin temel çalışma prensibi Şekil 378'de gösterilmiştir.



$$p = \rho\, g\, h + p_{ref}$$

Şekil 378. Sıvılı manometrenin temel çalışma prensibi

Tüpün sağ kolonuna uygulanan p basıncı, sıvının yoğunluğu ρ, yükseklik değişimi h, yerçekimi ivmesi g olmak üzere Δp kadarlık bir basınç farkı oluşturur. Uygulanan basınç ile sıvının yer değişimi dengede olduğunda, sol kolonda sıfır olmayan bir referans basınç için mutlak p basıncı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$p = \rho \times g \times h + p_{ref}$$

P : Mutlak basınç [Pa]

ρ : Akışkan yoğunluğu [kg/m^3]

g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

h : Sıvı yüksekliği [m]

p_{ref} : Referans basınç [Pa]

Bu tip manometreler, atmosfer basıncı ölçümünde ve uçaklarda aynı amaç için kullanılan altimetrelerin kalibrasyonlarında kullanılabilir. Atmosfer basıncı ölçme aralığında en doğru sonucu lazerli Michelson interferometre sistemlerinin kullanıldığı interferometrik metot verir. Bu metot, U-tüpündeki civa veya diğer akışkan sıvılarının (yağ gibi), yüzeyleri arasındaki seviye farkının interferometrik sistemle yüksek doğrulukla belirlenmesidir. İnterferometrik manobarometre sisteminde, basınç üzerindeki belirsizlik (5 - 10) ppm mertebesindedir. Manometreler, fark ve mutlak basınç ölçümleri yapmakta kullanılır. Mutlak ölçümler yapan yüksek kalitedeki cihazlarda "sıfır" referans basınç elde etmek için genelde iki aşamalı vakum pompaları kullanır. Manometrelerde çok değişik sıvılardan yararlanılmasına rağmen yüksek doğruluğa sahip bir çok manometrede sıvı olarak civa kullanılır.

Bu grup altında diğer basınç ölçerler ise **pistonlu basınç ölçerlerdir**. Pistonlu basınç ölçerlerin ana elemanı olan piston silindir ünitesi Şekil 379'da gösterilmiştir. Sistemin çalışma prensibini kısaca açıklayacak olursak: Yüzeyi çok iyi işlenmiş A_{eff} efektif alanına sahip pistonun altına uygulanan akışkan basıncı, akışkan içerisinde serbestçe yüzen piston üzerindeki F kuvvetiyle dengede olduğu zaman oluşturulan basınç;

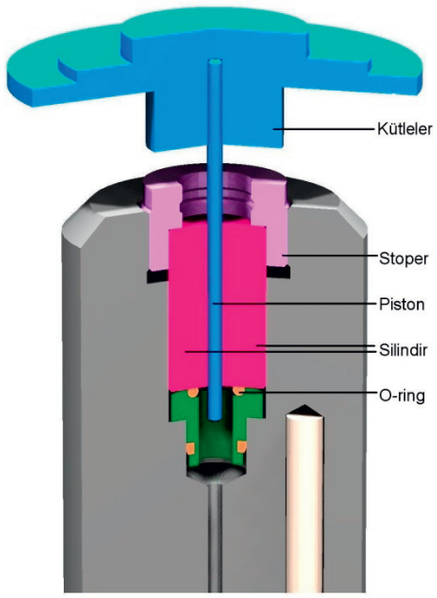
$$p = F / A_{eff}$$

p : Basınç [Pa]

F : Piston üzerindeki kuvvet [N]

A_{eff} : Piston efektif alanı [m^2]

olur.

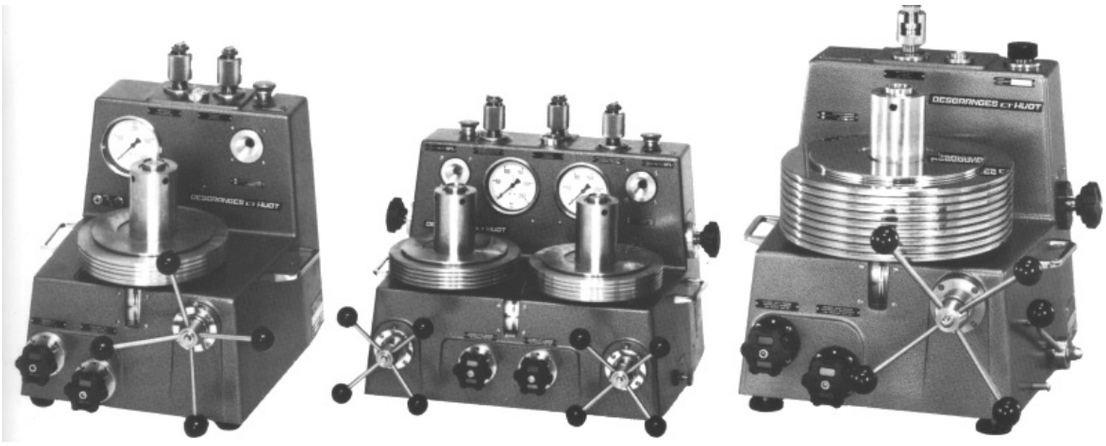


Şekil 379. Basit tip piston silindir yapısı şematik gösterimi [245]

Pistonlu basınç ölçerlerde, pistonun altına uygulanan akışkan basıncı, yağ veya gaz kullanılarak oluşturulabilir. Kullanılan akışkan türüne göre pistonlu basınç ölçerler ikiye ayrılabilir:

- Hidrolik Pistonlu Basınç Ölçerler
- Pnömatik Pistonlu Basınç Ölçerler

Hidrolik pistonlu basınç ölçerler yüksek ve çok yüksek basınçlarda, pnömatik pistonlu basınç ölçerler ise atmosfer basıncında ve yüksek basınç aralığındaki düşük basınçlarda kullanılır. Hidrolik sistemlerde ticari olarak satılanlarda 1,3 GPa basınca, özel amaçlı kullanılanlarda ise 2,6 GPa basınca ulaşılabilir (Şekil 380).



Şekil 380. Hidrolik ve pnömatik pistonlu basınç standartları [246]

Hidrolik cihazlarda atmosferik basıncın referans olarak alındığı gauge ve fark basıncı ölçümleri yapılırken, pnömatik cihazlarda hem gauge hem de mutlak basınç ölçümleri yapılmaktadır. Mutlak basınç ölçümü yapan sistemlerde, piston silindir ünitesi ve üzerindeki kütleler cam fanus içerisine alınarak vakum pompaları ile içerideki hava alınır (Şekil 381).

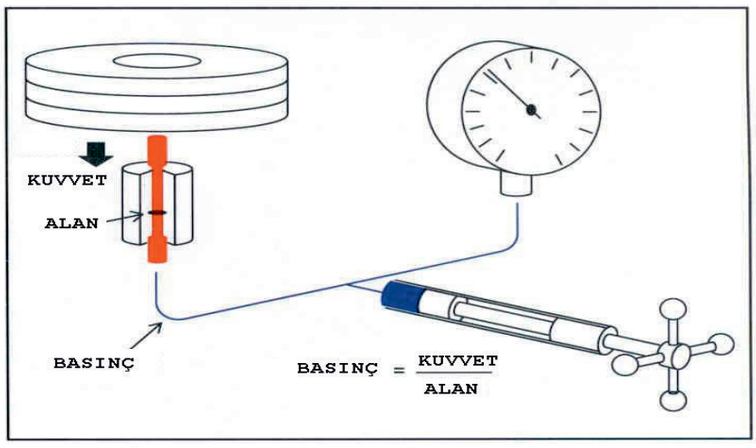


Şekil 381. Pnömatik pistonlu mutlak basınç standardı

Tüm pistonlu basınç standartlarında, basıncı dengeleyen kuvvet, akışkan içerisinde serbestçe yüzen piston üzerindeki kütleler ile (bu kütlelere pistonun ağırlığı da dahildir) oluşturulur. Yüksek doğruluğa ulaşabilmek için piston silindir arasındaki temas ve sürtünmenin minimize edilmesi gerekir. Birçok sistemde bu etkileri minimize edecek kuvvetler, silindir sabit kalmak üzere piston ve üzerindeki kütlelerin döndürülmesi ile sağlanmıştır. Döndürme ile oluşan kuvvetler, pistonun

silindir içerisinde merkezde durmasını sağlar. Ayrıca, piston ve silindir arasındaki ortam akışkanın, pistonun altındaki yüksek basınçtan üstteki alçak basınca doğru yaptığı yavaş akış ile oluşan yağlama filmini de muhafaza eder. Sistemin performansının iyi olabilmesi için piston ve silindirlerin düzgün, yüzeyinin iyi işlenmiş, kesitlerinin daireye çok yakın olması ve aralarındaki toleransın birkaç mikron (veya daha düşük) olması gerekir. Bu nitelikler özellikle pistonun ve silindirin iyi bir şekilde temizlenmesine ihtiyaç duyulan ve yağdan veya parçacık kirlenmesinden arındırılmış gazların kullanıldığı pnömatik ve gaz yağlamalı sistemler için önemlidir.

Pistonlu basınç standartları kullanılarak oluşturulan basınç üzerindeki belirsizlik değeri; yerçekimi ivmesi, kütleler, efektif alan ve mutlak basınç ölçümünde referans basınç üzerindeki belirsizlik değerleri göz önünde tutularak hesaplanır. Pistonlu basınç standardı bir cihazın referans olarak kullanıldığı bir ölçüm düzeneği Şekil 382'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 382. Piston-silindir ünitesi kalibrasyon düzeneği

İkincil Seviye Basınç Standartları

Kuvvetin dengelenmesi yoluyla doğrudan basınç ölçümü yapabilen cihazlara birincil basınç standartları denir. İnterferometrik manobarometre, pistonlu basınç standartları ve McLeod gageler birincil basınç standartlarına örnek verilebilir. Maddelerin fiziksel özelliklerinden yararlanılarak basınç ölçümünü gerçekleştiren cihazlara ikincil standartlar adı verilir. Manometreler ve basınç dönüştürücüleri ikincil basınç standartlarına örnek verilebilir.

Maddelerin, elastik deformasyon, piezo direnç ve piezo elektrik gibi fiziksel özelliklerinden faydalanılarak tasarlanmış, basınç ölçen cihazlara ikincil basınç ölçerler denir. Tablo 40'da ikincil basınç ölçerler için çeşitli fiziksel özellikler verilmiştir.

İkincil basınç ölçerleri iki başlık altında inceleyebiliriz:

Basınç Dönüştürücüleri

Mekanik basınç ölçerlerde bağlantıların tekrarlanabilirliği ve ibrenin gösterdiği değerin gözle okunması sırasındaki hatalarda en iyi basınç ölçerin belirsizliği % 0,1 ile sınırlanır. Basınç ölçerin tekrarlanabilirliği ise, imalatında kullanılan malzemenin özelliğine ve uygulanan basıncın yarattığı gerinime bağlı olan Bourdon tüpünün elastik olmayan davranışından dolayı sınırlanmıştır. Ayrıca yapı elemanlarının termal genleşmeleri ve elastik katsayılarının (termoelastik katsayısı) sıcaklıkla değişmesi sebebiyle, sıcaklık farkları basınç ölçerdeki okunan değerleri değiştirebilir. Elektroniğin kullanıldığı teknikler bu tip problemlerin seviyesinin küçültülmesinde kullanılır. Bu teknikler, ticari ve yaygın olarak satılan elektro mekanik transdüserlerde kullanılmıştır. Mekanik basınç ölçerlerde bulunan mekanik bağlantılar ve ibre, optik kaldıraç ile değiştirilmiştir. Tüpün ucundaki eğilme,

elektromekanik olarak tespit edilir ve uygulanan basınç değeri dijital olarak okunur. Veya tüpün eğilme sensöründen gelen elektronik sinyal, geri besleme devresi ile kullanılarak tüpün ucunun gerinimini ve buna bağlı olan elastik olmayan davranışını sıfırlayarak sıfır konumda bulunmasını sağlar. Bu durumda geri besleme sinyalinin büyüklüğü basınç ölçerin çıkış değerini oluşturur.

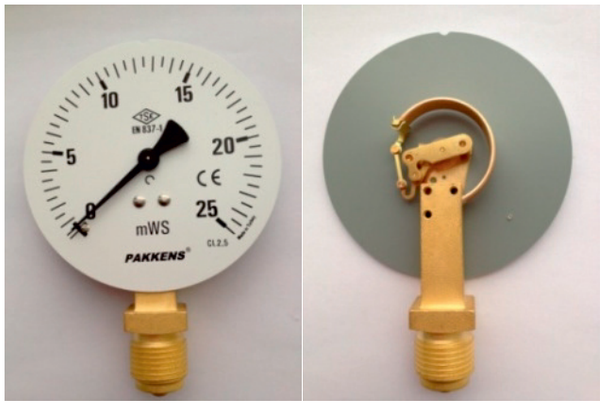
Tablo 40. İkincil basınç ölçerler için fiziksel özellikler

Özellikler	Değişiklik Gösteren Büyüklük	Basınç Sensörü	Dedekte Etme ve Gösterme Metodu
elastik	eğilme gerinim kuvvet	diyafram tüp körük kapsül	mekanik oranlı gösterge cihazı, deplasman dönüştürücüsü, fark transformatörü, kapasitif potansiyometrik, elektro-direnç gerinim ölçer, manyetik büzülme
piezo direnç	elektrik direnç	metal tel dirençli malzeme yarı iletken	Elektriksel
piezo elektrik	elektrik yükü	piezo elektrik transdüser kuartz yarı iletken	Elektriksel

Elastik davranışı çok iyi malzemeler (örneğin ergimiş kuvars gibi) basınç sensörü olarak kullanılabilir. Ergimiş kuvarsın ısıl genleşmesi diğerlerine göre küçük, buna karşılık, ısıl elastiklik katsayısı da nispeten büyük olduğundan sıcaklığa karşı oldukça hassastırlar. Sıcaklık hassasiyeti, sensörün sıcaklık kontrolünün sağlanmasıyla veya çıkışa uygulanacak sıcaklık kompanzasyonu ile azaltılabilir. Basınç ölçerin veya transdüserin performansını belirleyen temel etkenler, tasarım, malzeme, imalat tekniği ve kullanım ortamıdır. Bu etkenlerdeki küçük değişimler dahi aynı üreticiden çıkmış aynı iki ürünün performansının değişik olmasına sebep olmaktadır.

Manometreler

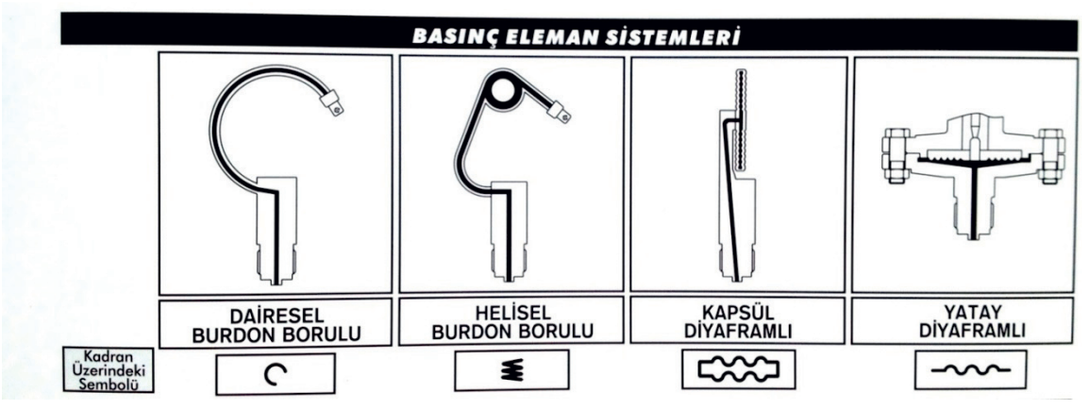
Manometreler içinde bulunan basınç duyargasına göre sınıflandırılabilir. Manometrelerin çalışma prensibi, içinde bulunan elastik elemanın uygulanan basıncı, bu basınçla orantılı harekete çevirmesine dayanır. Oluşturulan hareket, manometre içerisindeki uygun dişliler ve kollar yardımıyla, uygulanan basınç, gösterge üzerindeki ibreye aktarılır. Şekil 383'de örnek olarak iki adet manometre görülmektedir.



Şekil 383. Manometre

Ölçülen değerin hassasiyeti ve güvenirliliği, hareketi yaratan elastik elemanın tipine bağlıdır. Şekil 384'de basınç ölçümlerinde kullanılan elastik elemanlar gösterilmiştir. İçinde bulunan elastik elemana göre manometreleri şöyle sınıflandırabiliriz:

- Diyafram
- Düz
- Kıvrımlı
- Bourdon
- C şekli verilmiş
- Spiral
- Helisel
- Körük (Bellow)
- Kapsül
- Silindir



Şekil 384. Basınç ölçümünde kullanılan elastik elemanlar

Tablo 41'de ne tip bir elastik elemanın hangi basınç aralığında kullanılabileceği genel olarak gösterilmiştir.

Tablo 41. Elastik elemanlardaki basınç ölçüm aralıkları [247]

Eleman	Uygulama	Minimum Ölçme Aralığı	Maksimum Ölçme Aralığı
Bourdon	Basınç Vakum Karışık	(0 - 12) psi (0 - 30) inHg vak. 30 inHg – (0 - 15) psi	(0 - 60.000) psi (0 - 30) inHg vak. 30 inHg – (0-300) psi
Körük	Basınç Vakum Karışık	(0 - 1) inHg (0 - 1) inHg vak. > 1 inHg	(0 - 100) psi (0 - 30) inHg vak. < 100 psi
Metalik diyafram	Basınç Vakum Karışık	(0 - 10) inH_2O (0 - 10) inH_2O > 10 inH_2O	si inHg vak. 30 inHg vak. (0 - 10) psi

Diyaframlı tipteki manometreler, daha çok düşük basınç ölçümlerinde kullanılır. Diyafram, düşük basınç aralığındaki ölçümler için uygun olduğundan, mutlak basınç ölçümlerinde de elastik eleman olarak kullanılır.

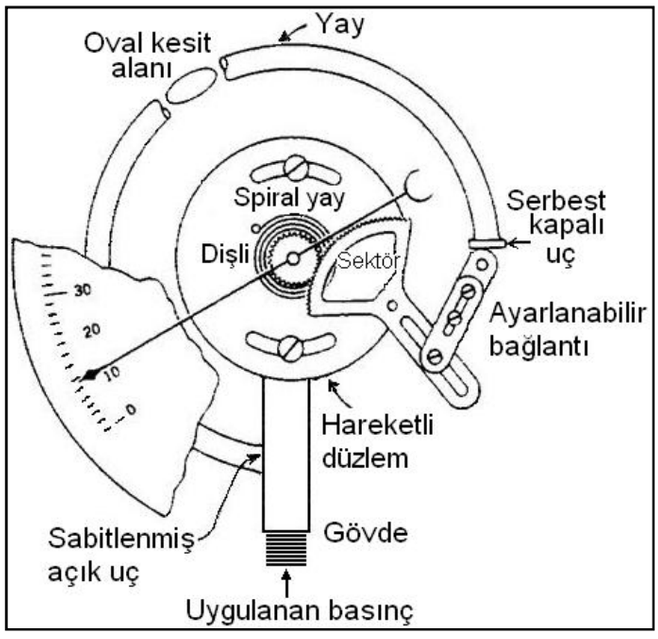
Bourdon tüplü basınç ölçerler 1849 yılında Fransız Eugene Bourdon tarafından bulunan Bourdon tüplü basınç ölçer günümüzde en yaygın kullanılan basınç ölçerlerdendir.

Bourdon tüplü manometreleri içinde bulunan bourdon tüpünün şekline göre 3 grupta toplayabiliriz:

- C şekli verilmiş
- Spiral
- Helisel

Bourdon tüpünün imalatında kullanılan malzemeler arasında pirinç, bronz, paslanmaz çelik, nikel krom çeliği yer alır. Bourdon tüplü basınç ölçerlerin hassasiyetleri ve ölçüm aralıkları, tüp imalinde kullanılan malzeme mukavemetinin ve boyutlarının seçilmesiyle belirlenir. Son zamanlarda, ergimiş kuvarsın kararlı bir malzeme olmasından dolayı, kuvars tüpler yüksek doğruluğun istendiği düşük basınç ölçümlerinde kullanılmaya başlanmıştır.

Bourdon tüplü bir manometrenin iç yapısı Şekil 385'de gösterilmiştir.

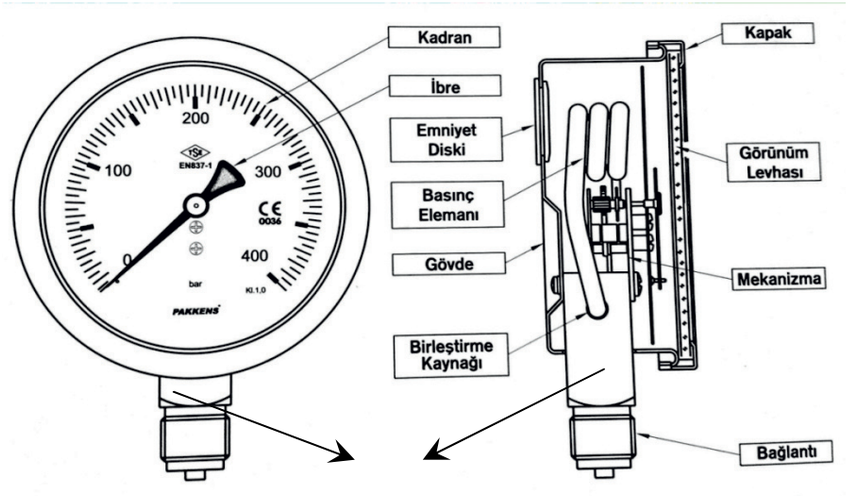


Şekil 385. Bourdon tüplü basınç ölçer [250]

Bourdon tüplü mekanik basınç ölçerlerde okunan değerde olabilecek en düşük belirsizlik % 0,1'dir. Mekanik göstergeli, atmosfer basıncı aralığında kullanılan, yüksek kalitedeki kapsüllü basınç ölçerlerde belirsizlik % 0,1'den daha düşüktür. Kuvvet dengeli ergimiş kuvarslı bourdon tüplerin belirsizlik değeri bir yıl veya daha fazla süre için % 0,01 civarında kalabilir. C şekli verilmiş bourdon tüplü basınç ölçerler, diğer tipteki bourdon tüplü basınç ölçerlere oranla daha yaygın bir şekilde kullanılır. Tüpün içine uygulanan basınç, tüpe verilmiş olan dairesel formun yapısında büyümeye sebep olur. Tüpün serbest ucunun yer değişimi mekanik olarak büyütülerek ibreye aktarılmıştır. Bu tipteki basınç ölçerlerin tüm skaladaki basınçları ölçebilmesi ve fiyatının uygun olması kullanımının yaygınlığına olanak sağlamıştır. Tüpün açık olan

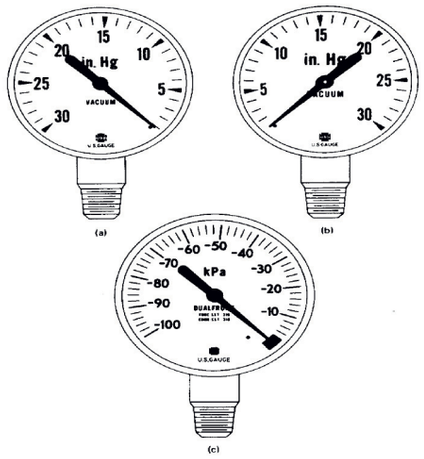
ucundan uygulanan basınç, tüpün kesit alanını değiştirmesinden dolayı, tüpün kapalı ucuna bağlı olan ibrenin, mekanik aksam yardımıyla skala üzerindeki hareketini sağlar. [250]

Manometreler, **skala ve gösterge tiplerine** göre de çeşitlere sahiptirler. Bu bölümde anlatılacak olan tüm manometrelerde, basınç birimi mekanik oranlı skala üzerinde hareket eden ibre ile gösterilir. Dış kılıfları gerekli olmamakla beraber, mekanik sistemi korumaya yönelik ve genellikle yuvarlaktır. İbrenin gösterge üzerindeki konumu, bir başka deyişle skala, Şekil 386'da de görüldüğü gibi iki şekilde tasarlanabilir. [247]

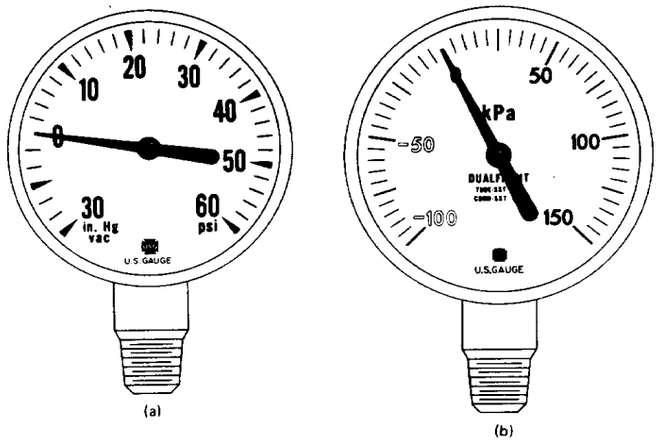


Şekil 386. Manometrelerin yapısal elemanları [247]

Birleşik manometre ile ortam basıncı değeri üstünde ve altında bir başka deyişle pozitif ve negatif basınç ölçülebilir. Skalanın pozitif basınç kısmı psi, negatif veya vakum kısmı ise psi veya inHg cinsinden işaretlenir. Şekil 387'de görülen 30-0-60 skalalı birleşik manometrede, 30 inHg vakum, 60 psi basınca kadar da pozitif basınç değerleri okunabilir. Şekil 388'de birleşik manometre görünmektedir.



Şekil 387. Negatif basınç ve vakum ölçen manometreler [247]



Şekil 388. Birleşik manometre [247]

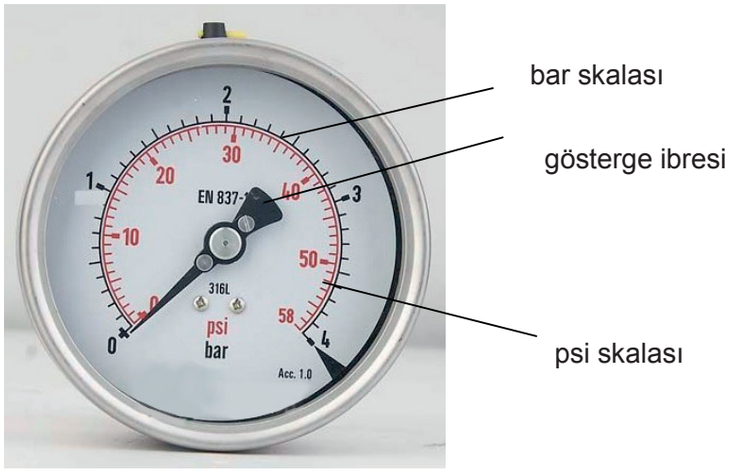
Çift ibreli manometre, farklı iki basınç kaynağına bağlanmış birbirinden bağımsız iki elastik elemandan ve kendilerine ait elastik elemanlara mekanik olarak bağlanmış iki ibreden oluşur. Çift ibreli manometre görünümü Şekil 389'da verilmiştir. [247]



Şekil 389. Çift ibreli manometre [247]

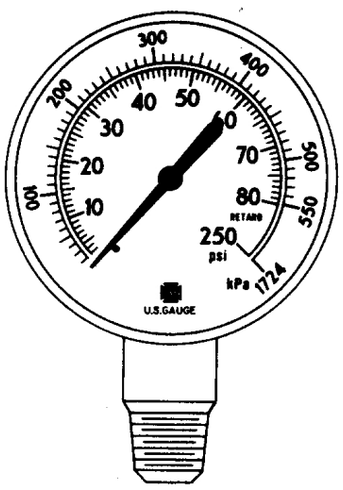
Fark basıncı ölçen manometre ise, farklı iki basınç kaynağına bağlanmış, birbirinden bağımsız iki elastik eleman ve iki basınç arasındaki farkı gösteren bir ibre ile tasarlanmıştır.

Çift skalalı manometrede, iki ayrı basınç birimi skala üzerinde yer almaktadır.

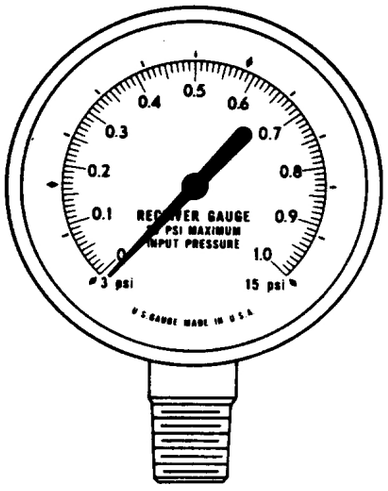


Şekil 390. Çift skalalı manometre [249]

Skalanın düşük değerlerindeki basınç değişimi ile ibre hareketi arasındaki mekanik hareket oranının, yüksek değerlerindeki orandan farklı olan manometrelere retard, skalada işaretlenmiş minimum basınç değerinin altındaki daha düşük basınçlardan, minimum değere kadar elastik eleman tarafından ibrenin hareket ettirilmediği manometrelere suppressed manometre denir. Örnek görünümler Şekil 391 ve Şekil 392'de verilmiştir. [247]



Şekil 391. Retard manometre [247]



Şekil 392. Suppressed manometre [247]

Manometrelerin Doğruluk Sınıflarına Göre Sınıflandırılması

Ölçme cihazının ölçülen büyüklüğün gerçek değerine yakın gösterge değerleri verme kabiliyetine ölçme cihazının doğruluğu denir ve manometrelerin ölçüm doğruluğu, ölçüm aralığının yüzdesi veya okunan değerinin yüzdesi cinsinden ifade edilir. Bunlardan birincisi daha yaygın olarak kullanılır.

Bir manometrenin ölçüm aralığının doğruluğunun yüzde cinsinden değeri aşağıdaki formül ile hesap edilir.

$$\%\ \text{doğruluk} = \frac{p_{test} - p_{ref}}{\text{Ölçüm Aralığı}} \times 100 = \frac{\Delta p}{\text{Ö.A.}} \times 100$$

Manometreler aşağıda belirtilen doğruluk sınıflarına ayrılırlar:

0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0

Göz önünde bulundurulması gereken ölçüm aralığı manometrelerin çeşitlerine göre değişir. Ölçüm aralığı, retard skalalı manometrelerde, retard edilmemiş bölgenin limitlerinin farkına, suppressed ve normal skalalı manometrelerde ise maksimum ve minimum skala basınç değerleri arasındaki farka eşittir.

Örneğin, referans basınç ile 300 psi basınçlık ölçüm aralığına sahip manometrenin göstergesinde okunan basınç arasındaki fark 1,5 psi ise, bu manometrenin doğruluğu ölçüm aralığı cinsinden % 0,5 olarak ifade edilir.

Bir manometrenin doğruluğu okunan değerin % 0,5 'i cinsinden verilmişse, 300 psi basınçtaki izin verilen maksimum hata,

$$300 \times \frac{0.5}{100} = \pm 1{,}5 \ \text{psi}$$

200 psi basınçtaki izin verilen maksimum hata,

$$200 \times \frac{0{,}5}{100} = \pm 1 \ \text{psi}$$

100 psi basınçtaki izin verilen maksimum hata,

$$100 \times \frac{0,5}{100} = \pm 0,5 \text{ psi'dir.}$$ [247]

Örnekten de anlaşıldığı gibi gösterge basınç değeri azaldıkça izin verilen hata değeri de küçülmektedir.

Basınç Dönüştürücüleri

Basıncın ani değerleri veya zamana bağlı değişimleri ölçülmek ya da aynı zamanda bir denetim aygıtına elektronik olarak taşınmak istendiğinde, manometre tarzındaki basınç ölçerler yetersiz kalır. Günümüzde pek çok endüstriyel uygulamada çevrim denetimi otomatik olarak yapılır. Bu otomasyonda kullanılan mikroişlemciler karar algoritmaları için elektronik olarak alınan basınç sinyallerine gereksinim duyar. Bu sinyalleri ani olarak duyup elektriksel bir işarete dönüştüren elemanlara basınç elemanları adı verilir.

Basınç elemanının basınç odası, dinamik ölçümler yapılırken, ölçme akışkanının küçük bir basınç kaybıyla içeri girip çıkmasını sağlayacak şekilde bir basınç kanalı ve bir zardan yapılmıştır. Bu zar üzerine, ölçülmesi istenen basınç uygulandığında, oluşan elastik şekil değişimi ya bir öteleme duyargası (indüktif, kapasitif dönüştürücü) ya da gerinim ölçer (strain gage) yardımıyla elektriksel büyüklüğe dönüştürülür.

Basınç elemanlarının uygulanan basınçla orantılı olarak ürettiği elektriksel sinyaller, elektronik devreler yardımıyla kuvvetlendirilip süzüldükten sonra bir gösterge, denetim elemanı veya bir yazıcıya gönderilirler.

Basınç elemanı zarının, uygulanan basınç altında ne kadarlık bir elastik şekil değişimine uğrayacağını, küçük çökmeler için analitik olarak hesaplamak mümkün olmakla beraber, kullanılmadan önce kalibre edilmesi gereklidir. Bu kalibrasyon, bilinen basınçların elemana uygulanması ve göstergede uygulanan basınç değeri sağlanana kadar, elemanın ayar devresi ile oynanması yardımıyla yapılır.

Bu tip elastik elemanların kullanıldığı basınç ölçme aletlerine basınç dönüştürücüleri denir. Elektrik elemanlı basınç dönüştürücülerine ise elektriksel basınç dönüştürücüleri adı verilir. Elektrik elemanlı basınç dönüştürücülerinin çokluğunun sebebi, elektrik sinyallerinin kolayca güçlendirilmesi, iletilmesi, kontrol edilebilmesi ve ölçülebilmesidir.

Basınç dönüştürücüler elektro mekanik manometreler sınıfında yeralan cihazlardır. Basınç dönüştürücüler uygulanan basınç ile orantılı bir gerilim, akım ya da frekans çıktısı üretirler. Bazı tür dönüştürücüler de bu çıktıları güçlendirilmiş ve şartlandırılmış olarak 5 V, 10 V, (4 - 20) mA ve RS232 gibi bir sayısal formda da verebilirler. Basınç dönüştürücü çeşitlerinden olan basınç transdüserlerinin çıkışlarında ürettikleri gerilim, akım ya da frekans çıktıları besleme gerilimi ile orantılı olmaktadır. Diğer bir tür olan basınç transmitterlerinde ise giriş ile orantılı olarak gerilim, akım ya da frekans çıktıları üretirler.

Bu açıklamalardan hareketle bir basınç dönüştürücü, giriş basıncını alır ve genellikle elektriksel bir forma dönüştürerek dışarı verir. Bu şekilde bir dönüşüm yapan cihazlar yerine neden basınç doğrudan ölçülmüyor? Bunun nedeni olarak, elektriksel bir çıkış değerini bilgisayar analizlerinde doğrudan kullanabilmek ya da basınç değerinin ölçüldüğü noktadan daha uzak bir yerden görüntülenebilme ve işlenebilme gereksinimi olarak gösterebiliriz. Ayrıca basıncın ani değerleri veya zamana bağlı değişimleri ölçülmek ya da aynı zamanda basınç değeri bir denetim aygıtına elektronik olarak taşınmak istendiğinde de basınç dönüştürücüleri bize çözüm oluştururlar.

Basınç dönüştürücülerini Şekil 393'de gösterilen bir kutuya benzetebiliriz. Bu kutunun içinde ne olduğuna ve nasıl çalıştığına bakmadan sadece girişi ve çıkışı üzerine yoğunlaşır. Burada ölçülecek büyüklük bizim için girdi oluşturur. Çıkış ise elektriksel bir büyüklük olmaktadır. Ayrıca basınç dönüştürücünün işlevini yapabilmesi için bir de besleme gerilimine ihtiyaç bulunur.



Şekil 393. Basınç dönüştürücü şematik gösterimi [257]

Elektrik elemanlı basınç dönüştürücülerini iki grupta sınıflandırılır: [250]

- Aktif elektriksel basınç dönüştürücüleri
- Pasif elektriksel basınç dönüştürücüleri

Aktif dönüştürücüler, mekanik yer değiştirme fonksiyonu olarak kendi elektriksel çıkışlarını oluştururlar, pasif dönüştürücüler ise, mekanik yer değiştirme fonksiyonu olarak elektriksel çıkış oluşturabilmek için dışarıdan bir elektriksel girişe ihtiyaç duyarlar.

Elastik ve elektrik elemanlı aktif elektriksel dönüştürücülere örnek olarak Piezo-elektrik kaydediciler verilebilir. Gerinim ölçer, kaygan uçlu potansiyometre, kapasitans kaydedici, lineer fark transformatörü, değişken manyetik dirençli üniteler, elektrik elemanlı pasif basınç dönüştürücülere örnek olarak gösterilebilir.

Dönüştürücülerin tüm çeşitleri, ortam sıcaklığı değişiminden büyük ölçüde etkilenir. Eğer dönüştürücü, sıcaklığı kontrol edilmiş bir laboratuvar yerine, bir traktörün veya bir uçağın motorunda kullanılmış ise, sıcaklık kompanzasyonunun önemi artar. Sıcaklık değişimi, dönüştürücünün sadece mekanik kısmını değil, elektronik elemanlarını da etkiler. Sıcaklık kompanzasyonunu sisteme ilave etmek istediğimizde cihazın fiyatı artacağından, dönüştürücünün çalışabileceği sıcaklık aralığının bir kısmını kompanze etme yoluna gidilerek maliyet düşürülebilir.

Tipik bir basınç dönüştürücüsünün özellikleri aşağıda verilmiştir:

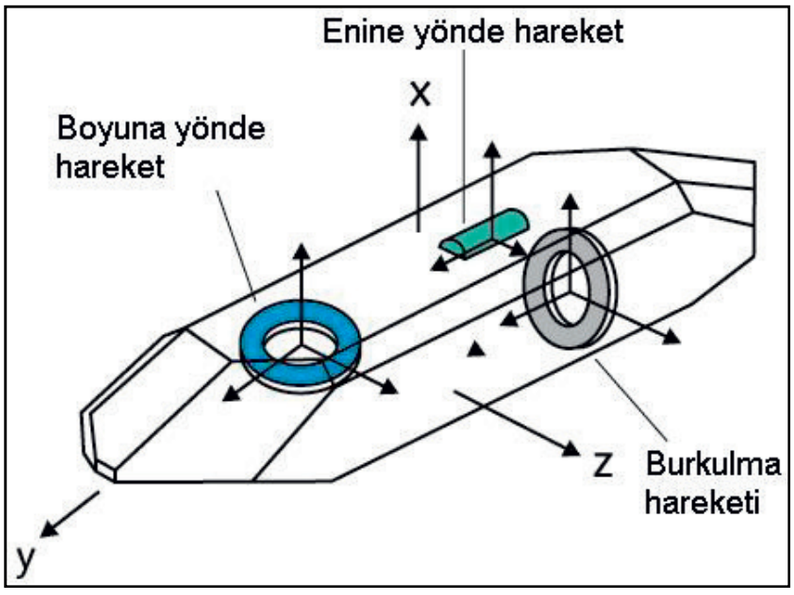
Basınç ölçme aralığı	:	(0 - 10) bar
Besleme gerilimi	:	8 V - 16 V DC
Çıkış gerilimi	:	1 V - 5 V DC
20 °C sıcaklıkta his.,lin., tekrarlanabilirlik	:	± 2 % veya 0,08 V
Çalışma sıcaklığı	:	-30 °C – 82 °C
-30 °C ile 82 °C arasında sıcaklık etkisi	:	% 0,02 / °C
Lineerite ve histerisiz	:	± % 0,5
Tekrarlanabilirlik	:	% 0,2
Çözünürlük	:	sonsuz
Uzun dönem kararlılık	:	± % 0,4 /yıl
Minimum yük empedansı	:	2,5 kΩ
Besleme akımı	:	10 mA

Aktif elektriksel basınç dönüştürücülerine örnek olarak piezoelektrik elemanlı dönüştürücüler verilebilir. Simetri merkezi içermeyen kristallerin uygun yönlerde gerilime maruz kaldığında yüzey potansiyel farkı oluşturma prensibine dayanır.

Pasif elektriksel basınç dönüştürücüleri ise, gerinim ölçerli tip basınç dönüştürücüler, potansiyometrik tip basınç dönüştürücüler, kapasitans tip basınç dönüştürücüler, lineer değişkenli fark transformatörü, değişken manyetik direnç tipi basınç dönüştürücüler gibi sınıflara ayrılırlar.

Aktif Elektriksel Basınç Dönüştürücüler

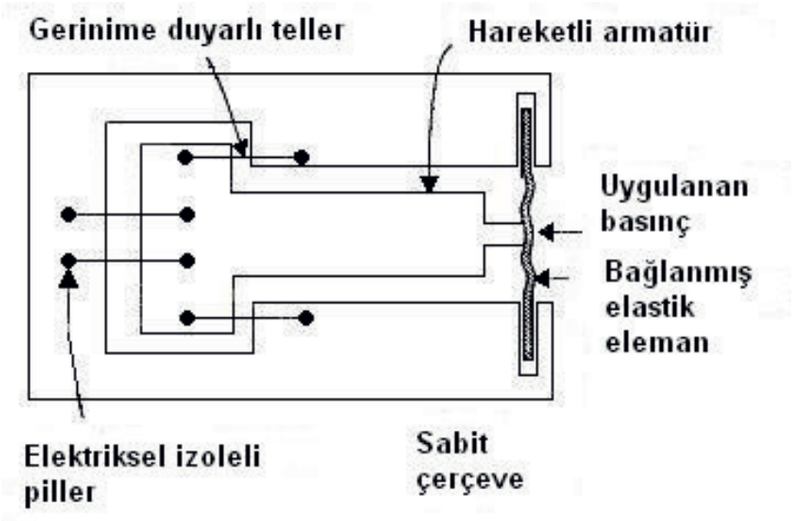
Aktif elektriksel basınç dönüştürücülerine örnek olarak piezoelektrik elemanlı dönüştürücüler verilebilir. Çoğu kristaller mekanik bir yüke maruz kaldıkları zaman bir elektrik yükü oluştururlar. Bu olay piezoelektrik etki olarak bilinir. Piezoelektrik ölçüm teknolojisi, günlük ölçümlerimizde kullanılan cihazlarla ölçüm yapılması zor olan bazı uç dinamik, sıcaklık ve geometri uygulamaları barındıran koşullar altında kullanılabilen iyi bir araç olarak karşımıza çıkar. Piezoelektrik etki 1880'li yıllarda Curie kardeşler tarafından keşfedildi. Simetri merkezi içermeyen kristallerin uygun yönlerde gerilime maruz kaldığında yüzey potansiyel farkı oluşturma prensibine dayanan bu etki, genellikle temel elektrik yük birimi piko-coulomb (pC) cinsinden ölçülür. Şekil 394'de kristal ve maruz kaldığı mekanik etkiler görülmektedir. Kuartz, Rochelle Tuzu, Barium Titanate gibi kristaller piezoelektrik özellik gösterirler. Bu tip aktif elemanlarla tasarlanan basınç algılayıcılarında, piezoelektriklik özelliği gösteren elemanların kristal geometrisi istenilen yönde maksimum piezoelektrik elde edilecek şekilde döndürülür. Akustik ve titreşim ölçme enstrümantasyonunda içi boş silindir, disk gibi şekillerdeki piezoelektrik algılayıcıların çok geniş bir kullanım alanı vardır.



Şekil 394. Piezoelektrik etkiyi oluşturan hareketler [258]

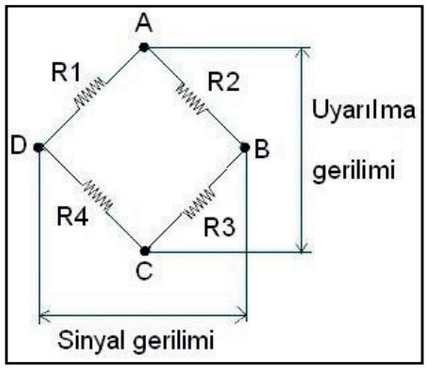
Pasif Elektriksel Basınç Dönüştürücüler

Gerinim ölçerli tip basınç dönüştürücüyü Pasif Elektriksel Basınç Dönüştürücüye örnek verebiliriz. Elektriksel direncin, bir yük altında tel boyunun uzunluğu ile değişmesi prensibine dayanır. Diyafram veya Bourdon gibi, basınca duyarlı elastik elemana yapıştırılmış olan gerinim ölçerde, uygulanan basınçla orantılı elastik bir şekil değişimi gözlenir, bu da elektriksel olarak ölçülebilecek bir direnç değerinin oluşmasına sebep olur. Gerinim ölçerler, basınca duyarlı elastik elemanlara veya şekil değişimine uğrayabilen elemana doğrudan bağlanmalıdır. Gerinim ölçerli basınç dönüştürücülerinin en çok kullanılan formu, elastik olarak şekil değiştirebilecek plakadan oluşur. Şekil 395'de görüldüğü gibi bu plaka üzerinde dört adet gerinim ölçer direnç teli, plakanın şekil değişimi sonucunda ikisi gerilme, diğer ikisi de sıkışma yönünde yerleştirilmiştir. [250] Bu dört elamanın çıkışı Şekil 396'da görülen Wheatstone köprüsüne bağlanmıştır.



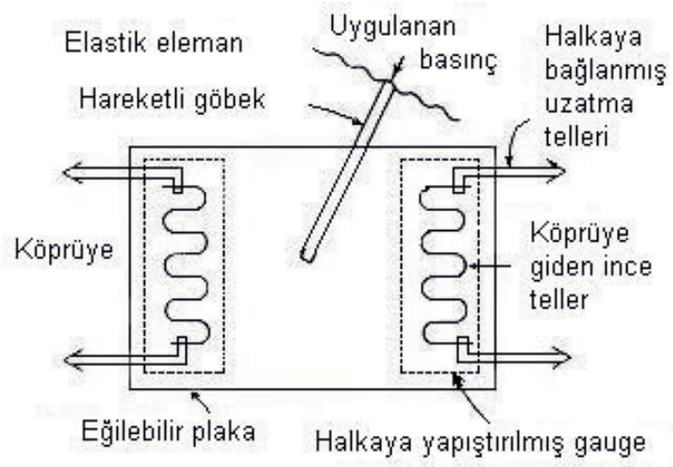
Şekil 395. Yapıştırılmayan tip gerinim ölçer [250]

R1 ile R4 dirençleri arasındaki oran, R2 ile R3 dirençleri arasındaki orana eşit olduğunda, A noktasından B noktasına doğru gerilim düşümü, A noktasından D noktasına doğru gerilim düşümü ile aynı olur. Gerinim ölçer elemanın bir gerinime maruz kalması, R4 ve R3 'ün direnç değerinde artmaya, R2 ve R1'in direnç değerinde azalmaya sebep olduğundan B ve D noktaları arasında bir gerilim farkı oluşacaktır. Bu değer uygun bir analog veya sayısal ölçer ile ölçülebilir ve ölçülen bu değerler arasında kalibrasyon ile bağlantı kurulabilir. Yukarıda belirtilen dört telin kullanımı köprü hassasiyetinin artmasını sağlarken, tellerin pinler arasında serbest olmasına izin verilmesi dönüştürücü için yüksek doğal frekansa sebep olabilir.



Şekil 396. Wheatstone Köprüsü [247]

Pasif elektriksel basınç dönüştürücüler için diğer bir örnek de Şekil 397'de görülen yapıştırılabilir tipte gerinim ölçerdir. Bu tip basınç dönüştürücü ise ince tel şeklindedir ve esnek yüzey üzerine uygun yapıştırıcıyla yapıştırılır. Bazen iki gerinim ölçer elemanı önlenemeyen sıcaklık etkilerini yok etmek amacıyla köprüye bağlanır. Bu durumda pasif dönüştürücüler için gerekli olan enerji girişi, köprünün uyarılma gerilimi olur.



Şekil 397. Yapıştırılabilir tip gerinim ölçer [250]

Gerinim ölçer ölçümlerinde sıcaklık değişimi dışında, hataya sebep olabilecek başka etkenler de vardır. Gerinim ölçer ölçümlerinden verimli bir sonuç alınabilmesi için, gerinim ölçerin uygulanan gerilme veya kuvvet yönünde bağlanması gerekir ve bunun için de gerilme yönü belirlenmelidir.

Gerinim ölçerli basınç dönüştürücülerinin bir çoğunda nominal köprü çıkış empedansı 350 Ω'dur. Uyarılma geriliminin değeri AC veya DC olarak 10 V'tur. Doğal frekans değeri 50.000 Hz'e kadar çıkabilir. Dönüştürücünün çözünürlüğü sonsuzdur ve bu tip gagelerin kalibrasyon belirsizliği genelde tüm skalanın % 1'i kadardır.

Endüstride Basınç Ölçümü Yapılan Alanlar, Uygulamalar

Endüstride ve günlük hayatta birçok yerde basınç ölçerlerle karşılaşmamız mümkündür.

- Basınç regülatörleri
- Kompresörler
- Yangın söndürme sistemleri
- Hidrolik presler
- Isıtma ve soğutma sistemleri
- Basınçlı kaplar
- Pompalar
- Otomotiv sanayi
- Vakum sistemleri
- Buhar kazanları ve türbinler
- Rafineri sistemleri
- Tıbbi cihazlar
- Hava araçları
- Gıda sanayi
- İlaç sanayi
- Meteoroloji

Tablo 42. Basınç birimleri dönüşüm tablosu [247]

Basınç Birimi	psi	kPa	bar	atm	kg/cm^2	inH_2O	cmH_2O	mmHg	inHg
psi	1	6,8948	0,068948	0,068046	0,070307	27,730	70,433	51,715	2,0360
kPa	0,145038	1	0,01	0,009869	0,010197	4,0218	10,215	7,5006	0,2953
Bar	14,5038	100	1	0,98692	1,0197	402,18	1021,5	750,06	29,530
Atmosfer	14,696	101,33	1,0133	1	1,0332	407,51	1035,1	760,00	29,921
kg/cm^2	14,223	98,067	0,98067	0,96784	1	394,41	1001,8	735,56	28,959
inH_2O (20 °C)	0,036063	0,24864	0,0024864	0,002453	0,002535	1	2,54	1,8650	0,073424
cmH_2O (20 °C)	0,014198	0,097891	0,000978	0,000966	0,000998	0,3937	1	0,7342	0,02890
mmHg (0 °C)	0,019337	0,13333	0,001333	0,001315	0,001359	0,5362	1,3620	1	0,03937
inHg (0 °C)	0,49115	3,3864	0,033864	0,033421	0,034531	13,620	34,594	25,4	1

7.5.7.3 Vakum Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Basınç veya yoğunluğun, standart atmosfer basıncının altında olduğu gaz ortamına vakum denir. Vakum, genellikle havanın sızmadığı bir hacimden vakum pompaları yardımıyla gazın boşaltılması ile elde edilir. Vakum ilk olarak, 1643 yılında civa dolu tüpün kullanıldığı *Torricelli*'nin ünlü deneyinde gösterilmişti. Civa kolonunun üzerindeki basınç "Torricelli Vakumu", *von Guericke* tarafından yaklaşık olarak 10 Torr olarak tahmin edilmiştir. Bizler bu değeri, günümüze kadar uzanan ultimate vakum değerinin azaltılması çalışmalarının başlangıç noktası olarak alabiliriz. Torricelli deneyinden 16 yıl sonra *von Guericke* ve *Robert Boyle* tarafından vakum piston-pompası icat edilmiş ve ilk vakum ölçümü civa manometresi yardımıyla içi boşaltılmış hacim içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sıvı ve katı fazlarında olduğunun aksine gaz molekülleri birbirleriyle bağlı olmayıp içerisinde bulundukları ortamı tamamıyla dolduracak biçimde serbestçe dolaşırlar. Bu molekülleri, oda içerisinde her yönde hızla hareket ederek birbirleriyle, duvarla, zeminle ve tavanla çarpışan tenis toplarına benzetebiliriz. Bu ise bize oda içerisindeki her yüzey üzerine bir kuvvetin uygulandığı sonucunu verir. Dolayısıyla böyle bir ortamı karakterize etmek için kullanılan fiziksel büyüklük gaz basıncıdır [251][253][259].

Basınç = Kuvvet / Alan

Basıncın "Uluslararası Birimler Sistemi"ne (SI) göre birimi, Pascal olarak da anılan metre kare başına newton (N/m^2)'dir. Vakum ölçüm birimi de Pa (N/m^2) olmakla beraber Torr, milibar gibi diğer basınç birimleri de sıkça kullanılır. Ancak, Ocak 1978'den beri Avrupa'da Torr birimi basınç birimi olarak kabul edilebilir olmaktan çıkmıştır. (ABD'de hala kullanımda olmasına rağmen). Alternatif birimler olarak Pascal ve mbar göze çarpmaktadır. mbar biriminde 10^3 çarpanı kullanıldığından SI birimi olarak alınmamasına rağmen Avrupa vakum endüstrisinde kullanımda oldukça rağbet gören bir birimdir. Milibar özellikle meteoroloji alanında sıkça kullanılmaktadır ve hava durumu haritalarında görülen basınç çizgileri (isobar) bu birimde verilir.

100 Pa = 1 mbar = 0,750062 Torr

Günümüzde pek çok Araştırma-Geliştirme çalışmaları ve üretim işlemlerinde vakum tekniği kullanılır. Vakum ölçümündeki doğruluk, sonuçların güvenirliği, ürün kalitesi ve güvenlikli üretim işlemleri üzerinde büyük önem arz eder. Ölçümlerdeki doğruluk ise kalibrasyonu gerçekleştirilmiş vakum ölçerlerin izlenebilirliğinin uygun vakum standartları üzerinden alınması ile sağlanır. 15 dekat basınç aralığını (10^5 Pa ile 10^{-10} aralığı) tek bir tipte birincil seviye standart ile sağlamak mümkün değildir. Bu sebeple bu aralığı kapsayan çeşitli standartlar kullanımdadır. Vakum alanındaki birincil ve ikincil seviye standartlar Tablo 43'de verilmektedir. Tabloda birincil seviye standart olarak bahsi geçmeyen moleküler ışın sistemi tanımlanmış olmasına rağmen bazı zorluklarından dolayı etkin olarak kullanılmamaktadır. Lazer soğurma spektroskopisi gibi optik yöntemlere dayanan bir takım bazı yeni teknikler üzerinde çalışılmaktadır ancak henüz kullanıma geçmemişlerdir [251].

Tablo 43. Vakum alanındaki birincil ve ikincil seviye standartlar

	Birincil Seviye Standartlar	İkincil Seviye Standartlar
10^5 Pa ↓ 10^{-10} Pa	Civa kolonu manometre Döner piston ölçer Basınç denge (balans) Statik genleşme sistemi Dinamik genleşme sistemi	Quartz-Bourdon manometre Rezonans silikon ölçer Kapasitans diyafram ölçer (CDG) Döner rotor ölçer (SRG) İyonizasyon vakum ölçer Kütle spektrometresi

Tablo 44'de genel olarak kabul gören ancak kaynaklara göre değişiklik gösterebilen vakum aralıkları verilmektedir [255].

Tablo 44. Vakum aralıkları ve basınç değerleri

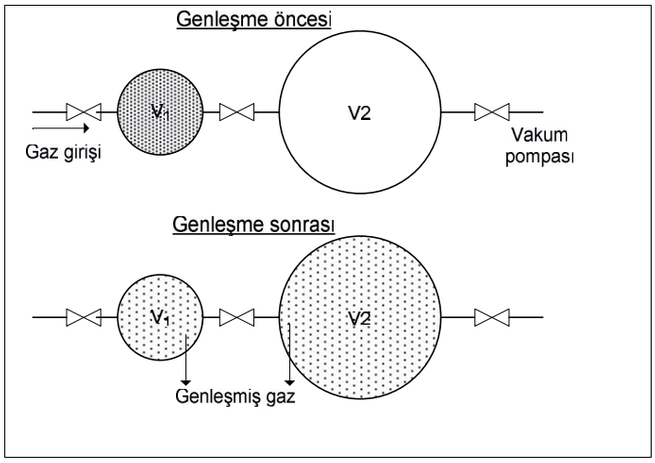
	Basınç (Pa)
Düşük ve Orta Vakum	10^{+5} ile 10^{-1}
Yüksek Vakum	10^{-1} ile 10^{-5}
Ultra Yüksek Vakum	$< 10^{-5}$

Atmosferik basınçtan yaklaşık 10 Pa'a kadar olan basınçlar, cıvalı manometrede olduğu gibi birim alan üzerine uygulanan kuvvet yöntemi ile doğrudan ölçülebilir. Günümüzde, 10 Pa basınç değerinin altında statik genleşme ve dinamik genleşme yöntemlerine dayalı sistemler kullanılır. Statik genleşme yöntemi yüksek vakumda, dinamik genleşme yöntemi ise yüksek ve ultra yüksek vakumda uygulanır. Birincil seviye standartların doğruluğunun test edilmesi için Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) düzenli aralıklarla anahtar karşılaştırmalar düzenlemekte ve farklı ülkelere ait standartların denklik derecesi belirlenmektedir [251].

Statik Genleşme Vakum Standardı

17. yüzyılda **Boyle ve Mariotte**, sabit miktardaki gazların basınç ve hacimleri arasındaki ilişkisini belirlemek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Deneyler, p basıncının artması ile V hacminin azaldığını gösterir. **Boyle-Mariotte** kanununa göre sabit sıcaklık ve miktardaki gaz için basınç ve hacim çarpımı değişmezdir:

pV = sabit



Şekil 398. Statik genleşme yöntemi [251]

Statik genleşme sistemleri (diğer bir ifadeyle hacim veya seri genleşmeli sistemler) yüksek ve orta vakum aralığında gerekli basıncı oluşturarak vakum ölçerlerin kalibrasyonlarında kullanılmakta olan birincil seviye sistemleridir. Statik genleşme sistemi temel olarak **Boyle-Mariotte** kanununa dayanır. Küçük bir hacimde göreceli olarak daha yüksek basınçtaki gaz, önceden havası boşaltılmış daha büyük bir hacme genleştirildiğinde basınç değeri sistemin hacim oranı oranında azalır (Şekil 398). Hacimlerde tam olarak eşit sıcaklık değeri yakalamak mümkün olmadığından hesaplamaların ideal gaz kanununa dayandırılması daha doğru sonuçlar verir. Bu durumda genleşme öncesindeki basınç, sıcaklık ve hacim değerleri sırasıyla p_1, V_1 ve T_1, genleşme sonrası basınç p_2, sıcaklık T_2 ve bağlantı elemanlarını da içeren hacim V_2 olması durumunda Eşitlik (239) elde edilir [251][256]:

$$p_1 \times V_1 / T_1 = p_2 \times (V_1 + V_2) / T_2 \quad (239)$$

Bu durumda genleşme sonrası basınç, Eşitlik (240)'daki gibi ifade edilir:

$$p_2 = (T_2/T_1) \times p_1 \times V_1 / (V_1 + V_2) \quad (240)$$

p_1 : Genleşme öncesi basınç [Pa]

V_1 : Genleşme öncesi hacim [m^3]

T_1 : Genleşme öncesi sıcaklık [Kelvin]

p_2 : Genleşme sonrası basınç [Pa]

V_2 : Genleşme sonrası hacim [m^3]

T_2 : Genleşme sonrası sıcaklık [Kelvin]

Boyle kanunu üzerinde izotermal olmayan şartlar ile gerçek gaz düzeltmeleri yapıldığında oluşturulmuş kalibrasyon basıncı Eşitlik (241) ile bulunur:

$$P_{kal} = p_1 \times (V_1 / (V_1 + V_2)) \times (1 - (B / R_m \times T) \times p_1) \times T_2 / T_1 \quad (241)$$

T_2/T_1 iki hacim arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan sıcaklık düzeltmesidir, $1-(B/R_m \times T) \times p_1$ terimi ideal gaz düzeltmesi ve R_m ise gaz sabitidir. Genleşme oranı $f = V_1/(V_1+V_2)$, V_1 ile V_2 hacimlerinin doğrudan ölçümleri veya ardı ardına yapılmış genleşmeler sonucunda belirlenir. Kalibrasyon basıncın her bir basınç noktası için p_i başlangıç basıncı ile sıcaklık ölçümlerinin yapılması gerekir.

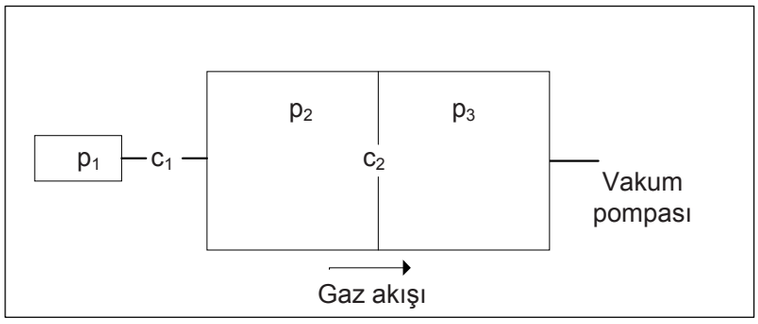
Statik sistemlerde, 10^{-6} Pa'a kadar adsorpsiyon (gaz moleküllerinin hacim yüzeylerine tutunması) etkisinin az olmasından dolayı genellikle Azot gazı (N_2) tercih edilir. "Genleşme oranı" olarak ifade edilen $V_1/(V_1+V_2)$ oranı genleşme sistemlerinde yüksek doğrulukla hesaplanması gereken en kritik parametredir. 1/100 ile 1/100000 arasında değişebilen genleşme oranı, tartım yöntemi, sabit basınç yöntemi ve genleşme yöntemi olarak adlandırılan üç farklı teknikle belirlenebilir. Damıtılmış su, alkol, civa gibi yoğunluğu bilinen sıvıların tartılması ile 100 cc üzerindeki hacimlerin belirlenmesinde daha doğru sonuçlar veren tartım yöntemi, vanalarla yapılandırılmış karmaşık bağlantılara sahip hacimlerin belirlenmesinde düşük doğruluklu ölçüm sonuçları verir. 100 cc altındaki hacimlerin belirlenmesinde kullanımı uygun olan sabit basınç tekniğinde ise hacmi bilinen pistonun genleşme öncesi ve sonrasında aynı basınç okumalarını verecek şekilde değişken hacim olarak kullanılması prensibine dayanır. Genleşme öncesi ve sonrası basınç ölçümlerine dayanan genleşme yönteminin en büyük avantajı ise yerinde ölçümlere imkân tanımasıdır ve sıklıkla tartım yöntemi ile birlikte kullanılır. Statik sistemlerde elde edilen basınç değerleri üzerindeki belirsizliğe etki eden ana parametreler genleşme oranı ve sıcaklık ölçümlerinden gelen belirsizliklerdir. Günümüzde çok aşamalı genleşmeye sahip statik sistemler kullanılır [251][252].

Dinamik Genleşme Vakum Standardı

Dinamik genleşme sistemlerinde statik sistemlerdeki gibi birbirlerinden oldukça farklı büyüklüklere sahip hacimlerin kullanımı yerine farklı iletkenliklere sahip orifisler kullanılır. Sistem, yüksek basınç hacmindeki kalibrasyon gazının dinamik olarak iki orifis üzerinden vakum pompasına genleşmesi prensibine dayanır. Sistem, iki orifis arasında harici bir gaz kaynağı olmaması şartıyla, orifisler üzerindeki net akışın izotermal şartlar altında birbirine eşit olmasını gerektiren süreklilik denklemini (enerji korunumu) sağlar (Şekil 399):

$$(p_1 - p_2) \times C_1 = (p_2 - p_3) \times C_2 \qquad (242)$$

p_1 : Başlangıç basıncı [Pa]
p_2 : Kalibrasyon basıncı [Pa]
p_3 : Son hacim basıncı [Pa]
C_1 : Geçiş iletkenliği [l/s]
C_2: : Orifis iletkenliği [l/s]



Şekil 399. Dinamik genleşme yöntemi [251]

p_2 ve p_3 basınçlarının sırasıyla p_1 ve p_2'ye göre ihmal edilmesi yaklaşımı ile Eşitlik (243)'de elde edilir:

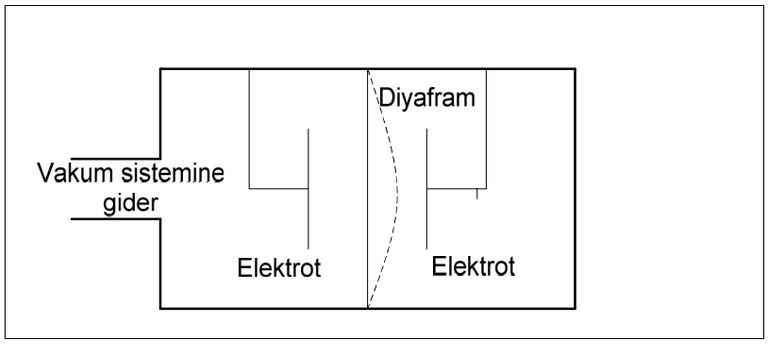
$$p_2 = p_1 \times C_1 / C_2 \quad (243)$$

p_1 başlangıç basıncı, orifislerin iletkenlik oranı nispetinde kalibrasyon basıncı olarak adlandırılan p_2 basıncına düşürülür. 10^{-6} l/s ile 10^{-5} l/s arasında değişen C_1 iletkenliği, C_2 iletkenliği (10 l/s – 100 l/s) ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür ve bu sayede istenilen basınç düşüşlerini sağlar. C_1 iletkenliği tarafından sağlanan çok küçük akış oranlarının basınca bağlı olması ve zaman içerisindeki kararlılığın sağlanmasındaki zorluklar bu tür sistemler için problem arz eder. Bu sebeple C_1 iletkenliği her kalibrasyon basıncı oluşturma öncesinde ölçülmelidir ve bu ölçüm, gaz giriş sistemi, içerisinde p_1 basıncının ayarlandığı ve ölçüldüğü vakum sistemi ve ölçüm ünitelerinden oluşan gaz akış metre ile gerçekleştirilebilir. Dinamik sistemlerde yüksek basınç limiti 10^{-2} Pa seviyelerindedir ve bu değer moleküler akıştan viskoz akışa geçiş tarafından belirlenir. Düşük limiti ise kalibrasyon hacmindeki artık (residual) basınç değeri ile akış metre tarafından yüksek doğrulukla sağlanabilen en düşük akış oranı belirler. Kalibrasyon hacminde elde edilebilecek basınç yaklaşık olarak 10^{-7} Pa civarındadır. Akış bölücü (flow divider) kullanımı ile daha düşük basınçlara ulaşmak mümkündür (10^{-10} Pa) [251].

Kapasitans Diyafram Ölçer (CDG):

Kapasitans diyafram ölçerler (CDG), basınçtaki değişiminden kaynaklanan diyaframın sapmasını elektrotlar arasındaki kapasitans değişimi ile elektronik olarak algılayan cihazlardır (Şekil 400). Mutlak ve fark olmak üzere iki farklı tipi söz konusudur. Mutlak ölçerlerde, sapma gösteren diyaframın bulunduğu referans hacim, toplayıcı (getter) malzeme ile ölçerin çözünürlük limitinin altındaki basınç değerinde vakum altında kapalı tutulur. Fark basınç ölçerlerde ise referans hacim kısmı açıktır. Ölçüm aralığı atmosfer basıncından 10^{-4} Pa değerlerine kadar uzanır. Çözünürlük limiti ise yaklaşık 1 mPa'dır. Şekil 400'de diyaframın her iki tarafında yer alan sabit elektrotlu iki taraflı kapasitans manometre görülmektedir. Hacimlerden bir tanesi referans basınçta tutulurken, diğer hacim basıncı ölçülmek istenen hatta bağlantıyı içerir.

Sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan değişimleri minimize etmek için bu tip ölçerlerin çoğu ısıtıcı ile belirli bir sıcaklıkta (45 °C) sabit olarak tutulur. Termal dengenin sağlanması için ölçümler öncesinde cihazın 12 saat ile 24 saat arasında çalıştırılması önerilir [251][253].



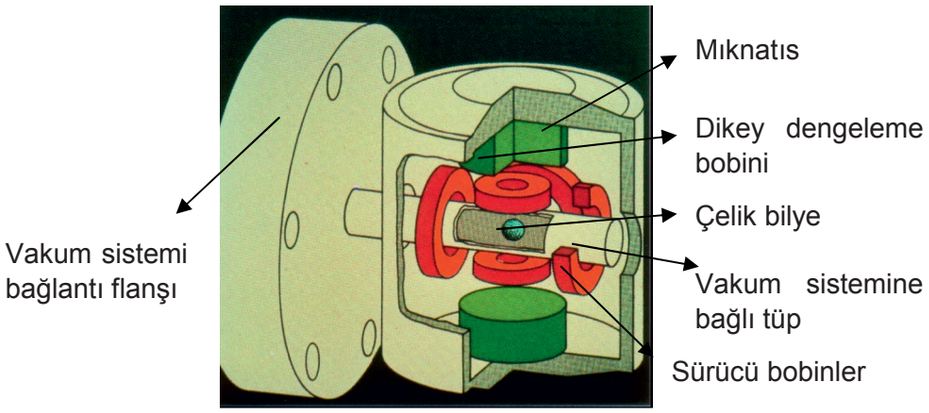
Şekil 400. Simetrik konfigürasyonda çift taraflı kapasitans diyafram ölçer [253]

Döner Rotor Ölçer (SRG)

Dönen bir bilyenın gaz ile olan moleküler etkileşimlerinden dolayı açısal hızındaki azalmasının moleküler akış bölgesindeki gaz basıncının ölçülmesinde kullanılan prensibe dayanır (Şekil 401). 400 °C'ye kadar ısıtılabilen paslanmaz çelik tüp (bir ucu kapalı diğer ucu ise basıncı ölçülecek olan sisteme flanş ile bağlı) içerisinde bulunan 4,5 mm çapındaki paslanmaz çelik

bilye permanent magnetler yardımıyla manyetize edilir. Sürücü manyetik alan ile bilye yaklaşık 415 Hz'e kadar hızlandırılır. Gerekli olan frekansa ulaştıktan sonra, sürücü kuvvetin ortadan kaldırılması ile bilyenın serbestçe dönmesine izin verilir. Gaz-bilye yüzeyi etkileşiminden doğan frekanstaki düşüş ve dolayısıyla çelik bilyenın açısal hızındaki azalma belirli bir zaman aralıklarında belirlenir ve mikroişlemci ünite yardımıyla basınç ölçümleri yapılır. Ölçüm aralığı 1 Pa ila 10^{-4} Pa arasında değişir.

Basınç değerleri yaklaşık 20 - 30 veri üzerinden ortalaması alınarak yenilenir. Ölçüm sistemi üzerindeki titreşimlerden sakınılmalıdır. Olası titreşimler ölçüm belirsizliğini yüksek oranda arttırır [251][253].



Şekil 401. SRG vakum ölçer

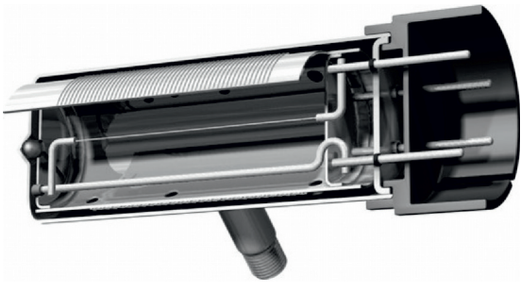
İyonizasyon Vakum Ölçer

İyonize edilen gazın parçacık sayı yoğunluğu ile doğru orantılı olan elektriksel akımı belirleme ile dolaylı olarak basıncı ölçerler. Sıcak katot ölçerlerde gazı iyonize edecek elektronlar katot üzerinden yayılır ve kendisini saran anot ekran üzerine hızlandırılırlar. Elektronlar, içerisinden geçtiği gaz molekülleri ile çarpışarak gazı iyonize ederler. Pozitif iyonlar iyon toplayıcıya ulaşarak basınç değerini verecek olan iyon akımını oluştururlar. Ölçüm aralığı 10^{-1} Pa ile 10^{-8} Pa arasında değişir. Bu tip ölçüm sistemleri üç elektrottan meydana gelir. Bunlar, katot (kızgın katot), anot ve iyon toplayıcısı. Bu tip vakum ölçerler düşük gerilimlerde ve harici manyetik alana ihtiyaç duymadan çalışır. Kızgın katot, elektronların yayıldığı bir kaynaktır. Elektronlar, elektrik alan içerisinde hızlandırılırlar ve elektrik alandan aldıkları yeterli enerjiyle elektrot sisteminin bulunduğu gazı iyonize eder. Oluşan pozitif gaz iyonları katoda göre daha negatif olan iyon toplayıcısına gider ve orada yüklerini bırakırlar. Oluşan iyon akımı, gaz yoğunluğunun ve aynı zamanda gaz basıncının bir ölçüsüdür.

Soğuk katot ölçerlerin ölçüm aralığı ise 1 Pa ile 10^{-5} Pa arasında değişir [251][253]. Manyetik alandan dolayı, elektronların yol uzunluğunun arttığı iyon deşarjı akımının ölçülmesiyle basıncın belirlenmesi fikri ilk olarak Penning tarafından sonuçlandırılır. Penning, Penning deşarjı olarak bilinen deşarjı oluşturmak için, birbiriyle kesişen elektrik ve manyetik alanı kullanmıştır. Ölçer, bir çift katot plakası, halka seklindeki anodun iki tarafında olacak şekilde düzenlenmiştir. Direnç ve ampermetreye seri olan bir 2 kV'luk DC kaynak elektrotlara bağlanmıştır ve manyetik alan, elektrot eksenine paralel olacak şekilde ayarlanmıştır. Gaz deşarjı içerisinde elektrotlar arasında elektronların hareketi, hem manyetik akı çizgileri boyunca helisel yollar seklinde gezmeleri, hem de manyetik alan sebebiyle, anot halkası içerisinde hapis kalmaları ile artmıştır. Pozitif iyonlar, manyetik alandan çok az etkilenirler ve katotta toplanırlar. Toplam deşarj akımı basıncın bir ölçüsü olarak kullanılır.

Pirani Vakum Ölçer

Pirani vakum ölçerlerin çalışma prensibi şu şekildedir: Ölçme başlığı içerisine kapatılmış metal tel, Wheatstone köprüsünün (kontrol ünitesi) bir ucuna bağlı durumdayken bilinmeyen basınçtaki gaza maruz bırakılır. Vakum referansı olarak görev yapan bir tüpte yaklaşık 10^{-3} Pa basınç altında sızdırmaz şekilde kapatılmış, ölçme başlığı içerisindeki ile aynı olan bir tel, köprünün komşu ucuna (R_2) bağlanmıştır. R_1-R_4 dirençleri yaklaşık aynı değere sahiptir. Ölçme başlığındaki tel, basınç değeri uygun bir değerdeyken (yaklaşık 10^{-3} Pa) ampermetrenin dengelenmesi için, R_5 ayarlanarak, ısıtılır, ölçme baslığında basınçtaki artış, gazın ısıl iletkenliği yoluyla, telin ısı kaybıyla sonuçlanan, köprüde bir dengesizlik oluşturacaktır. Uygun bir şekilde gerilimi arttırarak, ölçme baslığındaki telin başlangıçtaki sıcaklık değerine ulaşması sağlanıp, köprü yeniden dengelenir. Basınçtaki değişimi, ampermetredeki dengelenmiş akım gösterir. Ölçme başlığının bu çalışma metodu, sabit sıcaklık metodu olarak adlandırılır ve her bir basınç değerinin telin aynı sıcaklık değerinde alınmasına gerek duyar [253].



Şekil 402. Pirani vakum ölçer

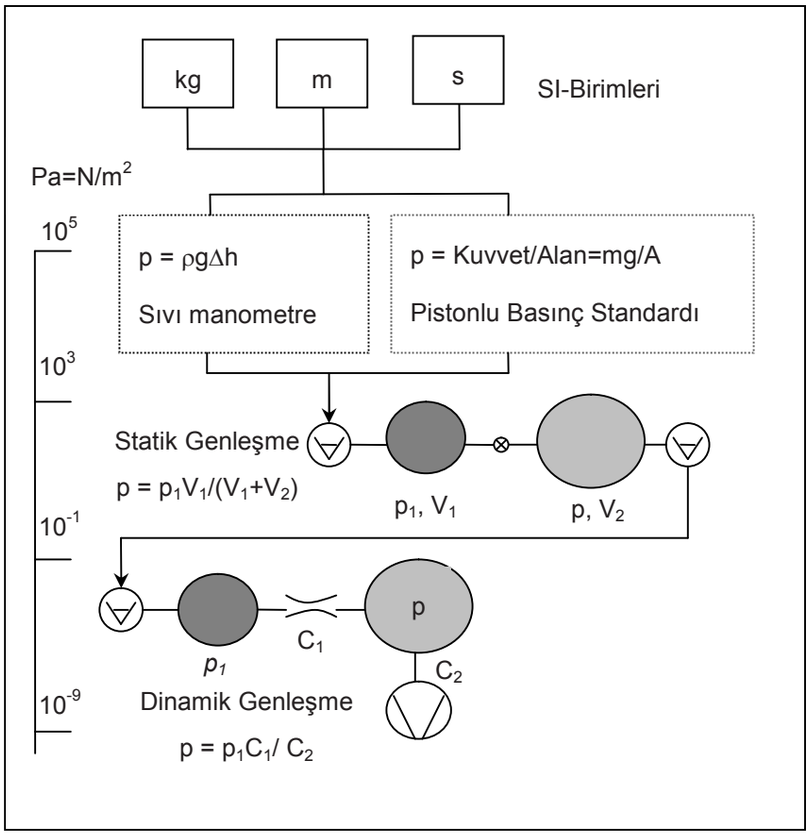
Isılçift tip Vakum Ölçer

Isılçift vakum ölçerlerin ölçme prensibi, pirani vakum ölçer ile aynıdır. Aralarındaki fark, ısılçift vakum ölçerlerde gaz ile temas halinde bulunan kızgın elemanın sıcaklığının doğrudan ısılçift yardımıyla ölçülmesidir. Filament AC veya DC kaynak ile sabit akımda ısıtılırken, bilinmeyen basınca maruz bırakılmıştır. Kızgın teli saran iletkenler arasındaki uzaklığın ortasına nokta kaynak yapılmış ısılçift, ibresi basınç birimi cinsinden kalibre edilmiş skala üzerinde hareket eden ampermetreyi çalıştırır. Basınç arttıkça, teldeki ısı kaybı artar, böylece ısılçiftin elektromotor kuvveti azalır [253].

Vakum Ölçer Metroloji Sistemi (VGMS)

VGMS sistemi, karşılaştırma yöntemi kullanılarak kalibrasyon işleminin gerçekleşmesini sağlayan örnek bir sistemdir. İkincil seviye kalibrasyon işlemleri bu sistem kullanılarak yapılır. Ölçüm aralığı 1×10^{-4} Pa ile $1{,}3\times10^{5}$ Pa'dır. Bu kalibrasyon sisteminin en önemli fonksiyonu sabit ve düzgün bir basınç değeri oluşturur. Yüksek vakum değerlerinde sabit basınç ve yüksek saflık elde etmenin en kolay yolu kalibrasyon gazının kalibrasyon hacmine düzgün akışla girişi ve vakum pompasıyla çıkışıdır. Düzgün referans basınç oluşturulduğunda test ve referans cihazların aynı basınçlarda aynı duyarlılığı göstermesi sağlanabilir. Bu parametre doğru ölçüm için en önemli etkendir.

VGMS sistemi kullanılarak iyonizasyon ölçer (sıcak ve soğuk katot), kapasitans diyafram manometre, pirani ve ısılçift ölçerlerin kalibrasyonları gerçekleştirilir. Transfer standardı olarak 1,10 ve 1000 Torr CDG ve SRG kullanılır. Sistemin taban basıncı 5×10^{-8} Torr'dur.



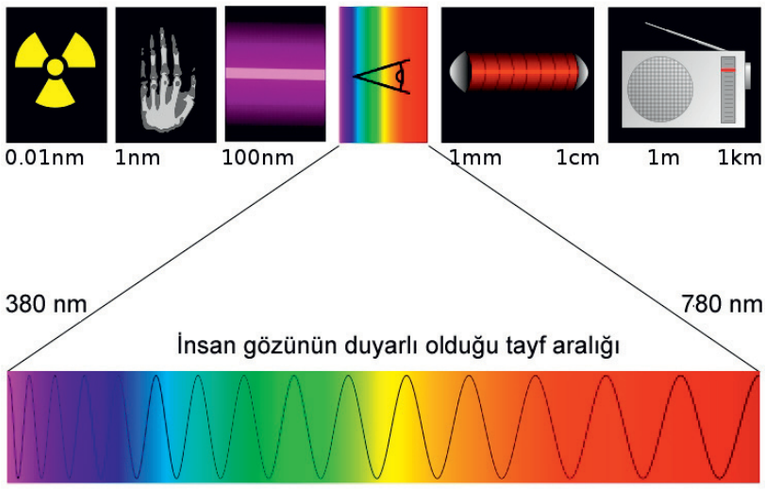
Şekil 403. Vakumda izlenebilirlik şeması [254]

7.6. FOTOMETRİK VE RADYOMETRİK ÖLÇÜMLER

7.6.1 IŞIK ŞİDDETİ

7.6.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Optik radyometri, elektromanyetik tayfın kızılötesi, görünür ve morötesi bölgelerindeki (3×10^{11} - 3×10^{16}) Hz ışınım enerjilerini (radyasyonu) inceleyen bilim dalıdır. İnsan gözü ise sadece bu radyasyon aralığının çok dar bir kısmına, 380 nm - 780 nm dalga boyu aralığına (görünür tayf) duyarlıdır ve bu aralığı ışık olarak algılamaktadır (Şekil 404).



Şekil 404. Elektromanyetik tayf

Belirtilen tayf aralığında görsel etkileri fotometriksel olarak ölçebilmek için ışık şiddeti birimi Kandela tanımlanmıştır. Kandela, tüm fotometrik ölçümler için temel oluşturmak amacıyla 1954 yılında CGPM tarafından kabul edilen yedi temel SI ölçüm büyüklüklerinden birisidir [260]. Kandela, 1948 yılına kadar standard mumlar (1860), yağ lambaları (1880), gaz lambaları (1898) ve karbon filamanlı lambalar (1909) gibi değişik birincil standart kaynaklar üzerinden elde edilmişti. 1948 yılında, kandela siyah cisimlere dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve CGPM tarafından "erimiş platinyumun donma-noktası sıcaklığında (2042 K) siyah cismin parlaklığı" olarak tanımlandı. Ancak platinyumun donma sıcaklığında siyah cisim kavitesinin homojen dışı emisyonuna sahip olması ve parlaklığının ~ % 2,1'den daha fazla değişmesi üretilen parıltı değerinin tekrar üretilebilirliğinde kararsızlığa neden oldu [261]. Bunun yanı sıra, ulusal laboratuvarların ışık şiddeti ölçeklerini karşılaştırmak için 1969 yılında CCPR (Comitė Consultatif de Photomėtrie et Radiomėtrie) tarafından uluslararası karşılaştırma düzenlenerek ve ışık kaynaklarının renk sıcaklığında da uyuşmazlıklar gözlemlendi. Bu uyuşmazlıktaki temel faktörün ise karşılaştırmalarda kullanılan modern tungsten filamanlı ışık kaynaklarının renk sıcaklığının (2856 °K) platinyumun donma sıcaklığından uzakta olması gösterildi. Aynı zamanda, monokromatik radyasyon yerine geniş-bant radyasyon kullanımı ve siyah cismin tayfsal emisyon dağılımını yüksek renk sıcaklıklarına çıkarmak için yapılan ekstrapolasyon işlemi, elde edilen radyasyonun maksimum tayfsal ışıksal verimliliğinin (K_m) hesaplanmasında ve ışık şiddeti birimi kandelanın elde edilmesinde ölçüm belirsizliğinin yükselmesine neden olmuştur [261].

1977 yılında, CIPM, K_m değerinin hesaplanmasında tüm dünyada yapılan farklı yöntemleri değerlendirerek bu değerin fotometrik ve radyometrik büyüklüklerin bağlantıları için 683 lm/W olduğunu bir sabit değer olarak kabul etti. 1979 yılında ise CGPM, ışık şiddeti birimi kandela'yı radyometrik birim (Watt) ile ilişkilendirerek tanımladı. Buna göre fotometrik bir büyüklük X_v karşılığı

olan radyometrik bir büyüklüğe $X_{e,\lambda}$ Eşitlik (244) ile dönüştürülebilir. Bu büyüklüklerin başlıcaları Tablo 45'de verilmiştir.

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \qquad (244)$$

X_v : Fotometrik büyüklük

K_m : Maksimum tayfsal ışıksal verimlilik [683 lm/W]

$X_{e\lambda}$: Radyometrik büyüklük

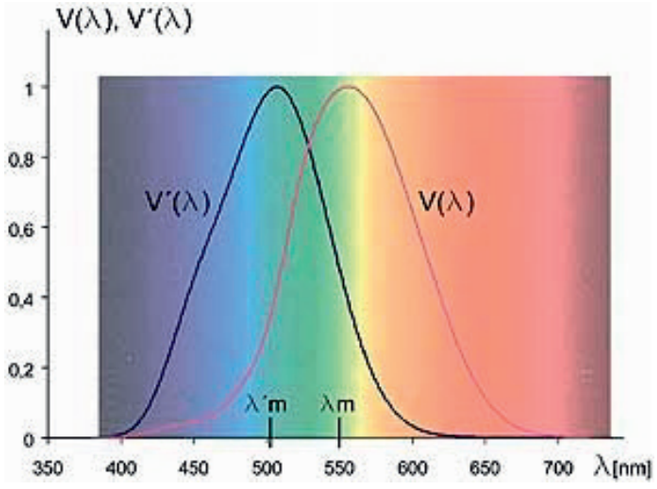
$V(\lambda)$: Fotopik görüş tayfsal verimlilik fonksiyonu

$d\lambda$: Birim dalgaboyu [nm]

Tablo 45. Fotometride ve radyometride kullanılan büyüklükler ve birimleri

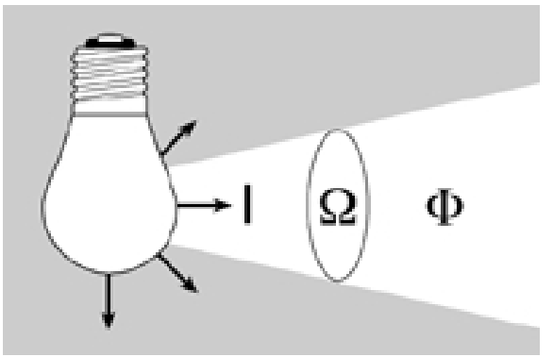
Fotometrik Büyüklük	Birim	Radyometrik Büyüklük	Birim
Işık Akısı	lm (lümen = cd sr)	Işıma Gücü	W (Watt)
Işık Şiddeti	cd (kandela = lm sr^{-1})	Işınım Şiddeti	W sr^{-1}
Aydınlık Düzeyi	lx (lüks = lm m^{-2} = cd sr m^{-2})	Işınım Düzeyi	W m^{-2}
Parıltı	cd m^{-2}	Işıma	W sr^{-1} m^{-2}

K_m'in değeri, Kandela'nın 1979 yılında tanımlanan yeni tanımına göre 1/683 W/sr ışıma şiddetine sahip 540×10^{12} Hz frekanslı monokromatik radyasyon kaynağının tek bir doğrultuda yayımladığı ışık şiddetine yani 683 lm/W'a eşittir. Tanımda vurgulanan 540×10^{12} Hz frekans, insan gözünün maksimum duyarlı olduğu 555 nm dalga boyuna karşılık gelmektedir. Görüldüğü gibi bu tanım kandela'nın 555 nm dalga boyunda gerçekleştirilmesi gerektiğini değil sadece fotometrik ve radyometrik büyüklükleri birbirlerine bağlayan K_m faktörünün nasıl 683 lm/W'a eşit olduğunu tanımlamaktadır. Kandela'yı görünür tayf aralığında belirlemek için 1924 yılında CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) tarafından belirlenen ve Şekil 405'den insan gözünün tüm görünür tayf aralığına olan duyarlılığının (~ 1 cd/m^2'den yüksek aydınlatmaya karşılık gelen $V(\lambda)$ fotopik tayfsal verimlilik fonksiyonunun) kullanılması gerekir [262][263].



Şekil 405. CIE tarafından 1924 yılında belirlenen insan gözünün ışığa ($V(\lambda)$) ve karanlığa ($V'(\lambda)$) duyarlılığının tayfsal eğrisi

Işık şiddeti (I_v), ışık kaynağından tek bir doğrultuda ve tek bir katı açı altında yayımlanan ışık akısıdır (Şekil 406) ve Eşitlik (245)'e göre ifade edilir.



Şekil 406. Işık şiddeti

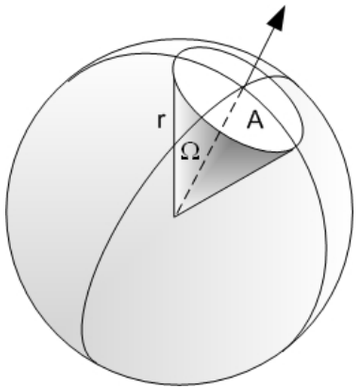
$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \qquad (245)$$

I_v : Işık şiddeti [cd]

$d\Phi_v$:Kaynaktan yayımlanan ışık akısı [lm]

$d\Omega$: Verilen doğrultuda katı açı [sr]

Katı açı bir küreden kesilen koniyi (Şekil 407) gösterir ve kesilen küre yüzeyi alanının (A) küre merkezinden olan uzaklığının karesine (r^2) olan oranı ile ifade edilir ($\Omega = A / r^2$).



Şekil 407. Katı açı

Bu tanıma göre ışık şiddeti birimi kandela, kaynak-tabanlı standartlar yerine dedektör-tabanlı standartlar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu nedenle elektriksel yerine-koyma prensibine göre çalışan krayojenik radyometre sistemi birincil standart ve silikon-tabanlı dedektörler ise transfer standardı olarak kullanılmaya başlandı. Silikon fotodiyotlar kararlı, hızlı tepkime süresine sahip olması ve yaklaşık olarak duyarlılığının bilinmesinden dolayı en çok tercih edilen algılama elemanlarıdır. Bununla beraber 1979 yılında bazı tip silikon fotodiyotların iç kuvantum verimliliğinin (500 – 950) nm dalga boyu aralığında 1'e çok yakın olduğu gösterildi [263]. Yeni tanıma göre kandela'nın gerçekleştirilmesinde ilk başlarda tek silikon fotodiyot temelli dedektörler kullanılmaktaydı. Ancak tekli fotodiyotların özellikle kısa dalga boylarında yüksek yansıtıcılığının olması fotometrelerde kullanılan fotodiyot ile V(λ)-filtre arasında çoklu yansımalara sebebiyet vermekte ve ölçüm doğruluğunu etkilemekteydi. Bu problemi ortadan kaldırmak ve fotometrik ve radyometrik büyüklüklerin gerçekleştirilmesindeki ölçüm belirsizliklerini iyileştirmek amacıyla tuzak dedektörler tasarlandı [264].

7.6.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Işık şiddeti birimi kandela'yı ölçmek için A/lx veya V/lx cinsinden ışıksal duyarlılığı kalibre edilen fotometre, fotometre başlığı, kalibreli aydınlık düzeyi ölçer cihaz (lüksmetre) veya tayfsal ölçüm yapabilen spektrofotometre veya spektroradyometre kullanılabilir. Ters kareler kanununa göre ışık şiddeti ölçümleri lambadan yaklaşık lamba boyutunun en az 10 katı uzaklıkta gerçekleştirilir. Lamba kararlı akımda çalıştırıldıktan sonra optik parametrelerin kararlı duruma gelmesi için ölçümler öncesinde en az 10 dakika beklenmelidir. Fotometre veya fotometre başlığı ile yapılan ölçümlerde, fotometre çıkışta elde edilen fotoakım (A) veya verilim çıkışı veren fotometrelerde gerilim değeri (V) fotometrenin ışıksal duyarlılığına (A/lx veya V/lx) bölünerek ölçülen lambanın ölçüm mesafesindeki aydınlık düzeyi (lx) elde edilmiş olur. Bu değeri, ölçülen mesafenin karesi ile çarparak (Eşitlik (246)) lambanın ışık şiddeti değerine ulaşılır.

$$I_v = y \times s_v^{-1} \times d^2 \qquad (246)$$

I_v : Işık şiddeti [cd]

y : Fotometre çıkışında elde edilen fotoakım veya gerilim [nA] veya [V]

s_v : Fotometrenin ışıksal duyarlılığı [A/lx] veya [V/lx]

d : Fotometre ile lamba arasındaki mesafe [m]

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, fotometreler genelde 2856 K renk sıcaklığında kalibre edildiği için başka bir renk sıcaklığında veya renkli LED'ler gibi farklı dalga boylarında emisyon yapan bir ışık kaynağının ışık şiddeti ölçüldüğünde Eşitlik (246)'ya göre elde edilen ışık şiddeti ölçüm sonucu, ölçülen lambanın optik güç dağılımına göre hesaplanan düzeltme faktörü ile çarpılarak mutlaka düzeltilmelidir [265]. Bu faktör aşağıdaki Eşitlik (247)'ye göre belirlenir ve renk-düzeltme-faktörü olarak da adlandırılır:

$$RDF(S_tS_s) = \frac{\int_{380}^{780} S_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda \int_{380}^{780} S_s(\lambda)R_g(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} S_t(\lambda)R_g(\lambda)d\lambda \int_{380}^{780} S_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \qquad (247)$$

$RDF(S_tS_s)$: Renk düzeltme faktörü

$S_t(\lambda)$: Ölçülen ışık kaynağının bağıl tayfsal güç dağılımı

$S_s(\lambda)$: CIE tarafından 2856 K renk sıcaklığında tanımlanan A tipi aydınlatıcının bağıl tayfsal güç dağılımı

$R_g(\lambda)$: Fotometre başlığının tayfsal duyarlılığı

$V(\lambda)$: Fotopik görüş tayfsal verimlilik fonksiyonu

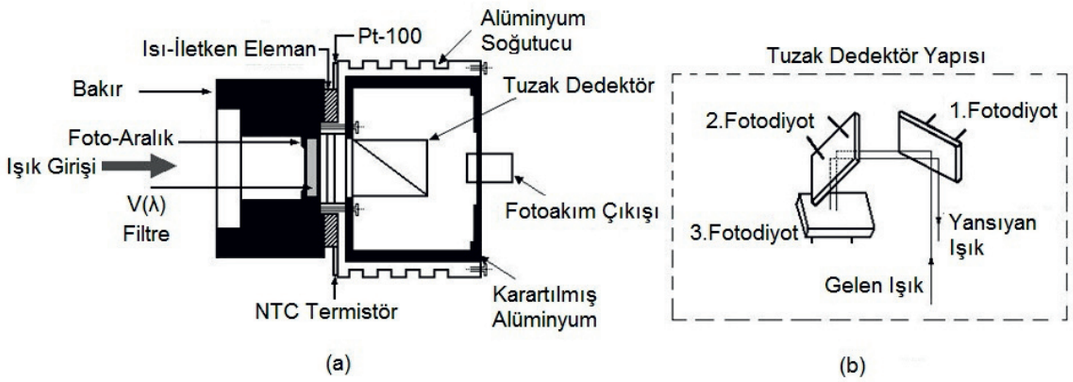
$d\lambda$: Birim dalgaboyu [nm]

Eğer ölçümler kalibreli lüksmetre cihazı ile gerçekleştirilirse bu durumda doğrudan ölçülen lx değeri yine mesafenin karesine çarpılarak ışık şiddeti değerine ulaşılır. Eğer ölçümler bir spektrofotometre veya bir spektroradyometre ile gerçekleştirilirse bu durumda spektroradyometre ile ölçülen tayfsal ışınım düzeyi değeri Eşitlik (246) kullanılarak aydınlık düzeyi değerine dönüştürülür ve yine ölçüm mesafesinin karesi ve Eşitlik (247) kullanılarak ışık şiddeti değerine ulaşılır.

TÜBİTAK UME'de ışık şiddeti birimi kandela 2003 yılına kadar kalibreli ışık şiddeti lambaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 2003 yılı sonrası ise kandela, tasarlanan referans filtre-radyometresi [266] ve filtre-radyometresine göre kalibre edilen çalışma standardı fotometre başlıkları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Filtre-radyometresi içerisinde kullanılan tuzak dedektörün mutlak tayfsal duyarlılığı, lazer dalgaboylarında helyum-soğutmalı krayojenik radyometre sistemi kullanılarak ölçülmüş ve tayfsal yansıtma ve iç kuvantum verimliliği içeren model fonksiyon kullanılarak ekstrapolasyon yöntemine göre diğer tüm görünür tayf aralığı için hesaplanarak elde edilmiştir. Filtre-radyometresi içerisinde kullanılan V(λ) filtresinin tayfsal geçirgenliği, radyometrenin insan gözünün tayfsal duyarlılığına uyumluluğu ve radyometre girişinde kullanılan foto-aralığın etkin alanının optik yöntemle belirlenmesi de bu çalışma kapsamında ayrıca incelenmiştir [267].

Işık Şiddeti Ölçeğinin Oluşturulmasında Kullanılan Fotometre (Filtre Radyometresi)

Işık şiddeti birimi kandela'nın gerçekleştirilmesi ve dedektör-tabanlı fotometrik ölçeğin oluşturulması için TÜBİTAK UME'de filtre-radyometresi tasarlanmış ve karakterize edilmiştir. Tasarlanan filtre-radyometresi Şekil 408'de gösterilmektedir.



Şekil 408. a) Filtre-radyometrenin şematiği, b) Fotodiyotların tuzak dedektör içerisindeki dizilişi [266]

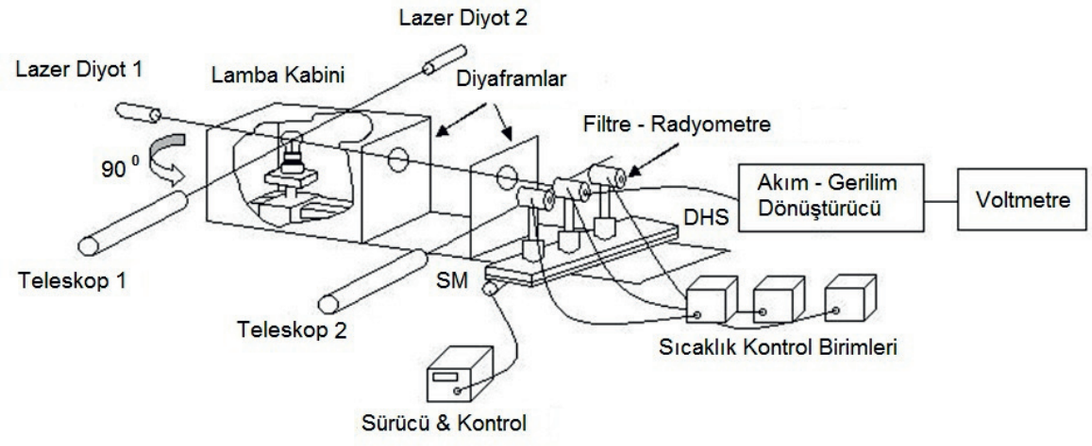
Filtre-radyometresinin temel bileşenlerini 0,1 cm^2 anma alanına sahip foto-aralık, insan gözünün algılama eğrisine uyumlu V(λ)-filtresi ve silikon fotodiyotlardan oluşan yansıtma tipi tuzak dedektör oluşturmaktadır. Filtre radyometresi haznesinin sıcaklığını (20 - 40) ºC aralıkta ayarlayabilmek için dairesel Peltier elemanı kullanılmış ve sıcaklık değeri Pt-100 sıcaklık sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık kontrol elektroniğinden geri-besleme alabilmek için tutucuya NTC termistör tutturulmuştur. Işık sınırlayıcı foto-aralıktan ve V(λ)-filtresinden geçtikten sonra üç adet Hamamatsu S1337-11 model cam korumasız fotodiyottan oluşan tuzak dedektör içerisine düşmektedir (Şekil 408.b). Tuzak dedektör içerisindeki fotodiyotların dizilişi gereği tuzak dedektöre düşen ışık demeti dedektörden geri çıkana kadar beş farklı yansımaya maruz kalmaktadır. Fotodiyotların bu dizilişi tuzak dedektörün düşen ışığa karşı polarizasyon bağımlılığını ortadan kaldırmakta ve tekli-fotodiyotla kıyaslandığında yüksek yansıtma kayıplarını en aza indirmektedir.

Işık şiddeti birimi kandela genelde NPL/GEC veya Wi41/G (Osram GmbH tarafından üretilen) özel tasarım tungsten-filamanlı standard lambalar kullanılarak fotometrik ölçüm düzeneğinde elde edilir. Fotometrik ölçüm düzeneğinin bir ucuna ışık şiddeti değeri ölçülecek lamba yerleştirilir. Lamba filamanının optik eksene dikliği ve fotometre ön yüzeyine paralelliği lamba tutucu altına yerleştirilen beş hareket serbestliğine sahip mekanizma ile sağlanır [266]. Yatay ve dikey eksenlerdeki lamba filaman ayarı genelde birbirlerine 90º açıda yerleştirilen iki adet teleskop veya iki adet lazer diyot kullanılarak gerçekleştirilir. TÜBİTAK UME'de bu işlem iki adet

lazer diyotla sağlanmaktadır (Şekil 409). Şekilde gösterilen ilk lazer diyot aynı zamanda optik ekseni de tanımlamaktadır ve filtre-radyometresinin sınırlayıcı foto aralığının merkezi bu eksene dik olacak şekilde ayarlanır.

Lamba kararlı DC güç kaynağı kullanılarak sabit-akım kontrol koşulunda ve uygun polaritede çalıştırılır. Doğru ölçüm sonuçlarına ulaşmak bakımından ölçüm süresince lamba akımının mümkün mertebe kararlı kalması gerekmektedir (< % 0,02). Lamba akımı kalibreli şönt direnç üzerinden (0,1 Ω) ölçülen gerilime göre elde edilir. Lamba akımının ölçüm süresince değişimini izlemek için ise yazlım kullanılması tavsiye edilir. Bu amaç için Optik laboratuvarında LabVIEW programlama dilinde yazılım geliştirilmiştir.

Eğer lamba, fotometrik ölçümler için kullanılan ve A (m^2) sınırlı foto-aralığa sahip fotometre yüzeyinden (filtre radyometresinden) d (m) mesafedeki bir yere yerleştirilirse bu durumda lambanın ışık şiddeti I_v (cd) fotometre çıkışında ölçülen fotoakıma göre I_{pc}(A) Eşitlik (248) kullanılarak hesaplanır [268]:



Şekil 409. Işık şiddeti ölçüm sistemi. SM - servo motor, DHS - doğrusal hareket sistemi

$$I_v = d^2 \times I_{pc} \times \frac{K_m \int_{380}^{780} S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{A \int_{380}^{780} S(\lambda)R_g(\lambda)d\lambda} \times \frac{1}{R(555)} \qquad (248)$$

I_v : Lambanın ışık şiddeti [cd]
d : Fotometre yüzeyi ile lamba arasındaki mesafe [m]
I_{pc} : Fotometre çıkışında ölçülen fotoakım [A]
K_m : Maksimum tayfsal ışıksal verimlilik [683 lm/W]
$S(\lambda)$: Lambanın görünür bölgede bağıl tayfsal güç dağılımı
$V(\lambda)$: Fotopik görüş tayfsal verimlilik fonksiyonu
$R_g(\lambda)$: Fotometre başlığının bağıl tayfsal duyarlılığı
R(555) : Fotometre başlığının mutlak (555 nm dalga boyunda) duyarlılığı [A/W]
A : Fotometre başlığının foto aralığı [m^2]
$d\lambda$: Birim dalgaboyu [nm]

Eşitlik (248)'de gösterilen iki entegralin oranı, $V(\lambda)$ eğrisi ile fotometrenin göreceli tayfsal duyarlılığı arasındaki uyumluluğunu (F) tanımlamaktadır.

$$F = \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda)R_g(\lambda)d\lambda} \qquad (249)$$

F : Fotometrenin bağıl tayfsal duyarlılığı ile V(λ) eğrisi arasındaki uyumluluğu

S(λ) : Lambanın görünür bölgede bağıl tayfsal güç dağılımı

V(λ) : Fotopik görüş tayfsal verimlilik fonksiyonu

$R_g(\lambda)$: Fotometre başlığının bağıl tayfsal duyarlılığı

dλ : Birim dalgaboyu [nm]

İdeal fotometreler için bu oran 1'e eşit olmalıdır. Ancak pratikte böyle bir fotometre bulunmamaktadır.

Optik laboratuvarında gerçekleştirilen ölçümlerde lamba filaman düzlemi ile filtre radyometresi foto-aralık düzlemi arasındaki mesafe lazer enterferometresi ve çapraz-çizgilere sahip iki adet optik teleskop kullanılarak 4000 mm'ye ayarlanmıştır. Mesafe d_0, iki aşamada ölçülmüştür. İlk aşamada lamba filamanı düzlemi ile filtre radyometresi ön yüzeyi arasındaki mesafe d_1 ölçülmüştür. Daha sonra ise filtre radyometresi ön yüzeyi ile fotoaralık düzlemi arasındaki mesafe d_2 ölçülerek hesaba katılmıştır ($d_0 = d_1 + d_2$). Nihai mesafe değeri, kullanılan optik teleskopların ölçüm hataları da hesaba katılarak $d = d_0 \times (1+ (\Delta L_1 + \Delta L_2) / d_0)$ eşitliğine göre elde edilmiştir.

Işık şiddeti ölçümünde kullanılan filtre radyometresi 10 µm çözünürlüklü ve bilgisayar kontrollü doğrusal hareket sistemi üzerine yerleştirilmiştir. Filtre radyometresi haznesi içerisindeki sıcaklık, sıcaklık kontrol ünitesi kullanılarak (25,00 ± 0,01) ºC'ye set edilmiştir. Filtre radyometresi çıkışında elde edilen fotoakım, (10^3 - 10^9) V/A kazanç ayarlı akım-gerilim dönüştürücü kullanılarak gerilime dönüştürülmüş ve yüksek-çözünürlüklü $8^{½}$ basamaklı sayısal voltmetre ile ölçülmüştür. Kaçak ışıkların ölçüm üzerindeki etkisini minimize etmek için ölçüm düzeneğinde iki adet diyafram kullanılmıştır.

7.6.2 IŞIK AKISI

7.6.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Işık akısı, bir ışık kaynağının fotometrik karakteristiğini tarif eden en önemli ölçüm parametrelerinden birisidir ve insan gözünün 380 nm - 780 nm dalga boyu aralığında algıladığı ışık gücünün miktarını ifade etmektedir [269]. Işık akısının standart ölçüm birimi lümen'dir (simgesi: lm). Eşitlik (250)'de görüldüğü gibi ışık akısı hem ışınım yapan kaynağın gücüne hem de insan gözünün duyarlılığına bağlıdır.

$$\Phi_v = \Phi_e \times K_m \times V_\lambda \qquad (250)$$

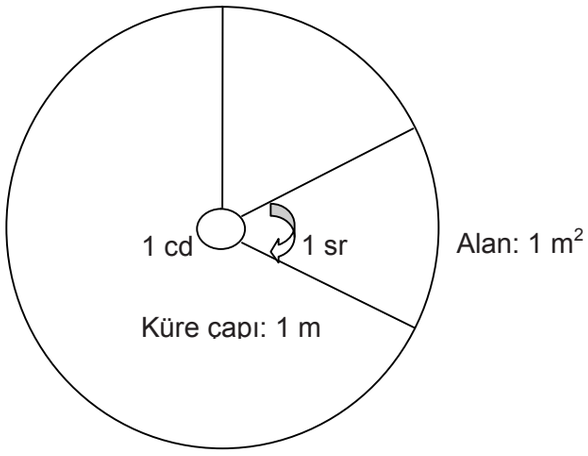
Φ_v : Işık akısı [lm]

Φ_e : Işınım akısı [W]

K_m : Maksimum tayfsal ışıksal verimlilik [lm/W]

V_λ : Fotopik görüş tayfsal verimlilik fonksiyonu

Eğer, 1 cd ışık şiddetine sahip tek biçimli bir noktasal ışık kaynağı Şekil 410'da gösterildiği gibi 1 m çaplı toplama küresinin merkezine yerleştirilirse bu durumda küre içerisinde her bir 1 steradyan (sr) katı açı altında yayımlanan ve 1 m^2 alanda algılanan ışık akısı 1 lm olacaktır (1 lm = 1cd sr). İnsan gözünün fotopik duyarlılığı dikkate alınırsa 1 lm ışık akısı 1,46 mW ($1{,}46\times10^{-3}$ W) ışınım gücüne karşılık gelir. Dolayısıyla toplama küresinin toplam yüzey alanı $4\pi r^2$ olduğundan 1 cd ışık şiddetine sahip tek biçimli bir noktasal ışık kaynağının toplam yayınlamış olduğu ışık akısı 12,57 lm (555 nm dalga boyundaki ışınım gücü ise 18,4 mW) olacaktır.



Şekil 410. Işık akısı biriminin elde edilmesi prensibi

Işık kaynaklarının ışık akısı birimi lümen iki farklı yaklaşıma göre elde edilebilmektedir. Bunlardan birincisi gonyofotometrik ölçüm sistemine göre ışık akısının mutlak olarak elde edilmesi, ikincisi ise toplama küresi (Ulbricht küresi) ve ışık akısı değeri bilinen referans ışık kaynağı kullanılarak göreceli olarak ışık akısının elde edilmesidir. Gonyofotometrelerin kurulumu için geniş alan, karanlık ortam ve yüksek-çözünürlüklü konumlama mekanizmaları gerekmektedir. Bu nedenle yüksek hassasiyet gerekmediği durumlarda toplama küresi tabanlı yöntemin kullanılması daha avantajlıdır. Toplama küresinin kullanılması aynı zamanda ölçüm süresini de kısaltmaktadır.

7.6.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Mutlak Işık Akısı Ölçüm Prensibi

Işık akısı biriminin gonyofotometrik yöntemle elde edilmesi için kalibre edilen ışık kaynağının tüm katı açılarda ($\Omega=\int d\Omega=4\pi$) yayınlamış olduğu ışık şiddeti biriminin (cd) veya kapalı alan üzerindeki aydınlık düzeyi (lx) biriminin Eşitlik (251)'deki gibi ölçülerek toplanması gerekmektedir [269][270].

$$\Phi_V = \int_\Omega I_V d\Omega \qquad \text{veya} \qquad \Phi_V = \int_A E_V dA \tag{251}$$

Φ_v : Kalibre edilen ışık kaynağının ışık akısı değeri [lm]

I_v : Kalibre edilen ışık kaynağının ışık şiddeti değeri [cd]

Ω : katı açı [sr]

E_v : Işık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

A : Aydınlık düzeyinin ölçüldüğü kapalı alandır [m^2]

Doğru sonuca ulaşabilmek için ölçülemeyen alanı (ölü açıyı) mümkün olduğu kadar dar tutmak gerekir. Şekil 411'de gösterildiği gibi bir ışık kaynağının küresel koordinatlarda açısal ışık şiddeti dağılımını $I_v(\theta,\varphi)$ ve açısal aydınlık düzeyi dağılımını $E_v(\theta,\varphi)$ olarak gösterirsek ve katı açı ile kapalı alanı $d\Omega = dA / r^2 = 2\pi \sin\theta\, d\theta$ ve $dA = d\Omega\, r^2 = 2\,\pi\, r^2 \sin\theta\, d\theta$ olarak ifade edersek, Eşitlik (252) elde edilebilir [271].

$$\Phi_v = \int_{\varphi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi} I_v(\theta,\varphi)\sin\theta\, d\theta d\varphi \quad \text{ve} \quad \Phi_v = r^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi} E_v(\theta,\varphi)\sin\theta\, d\theta d\varphi \tag{252}$$

Φ_v : Kalibre edilen ışık kaynağının ışık akısı değeri [lm]

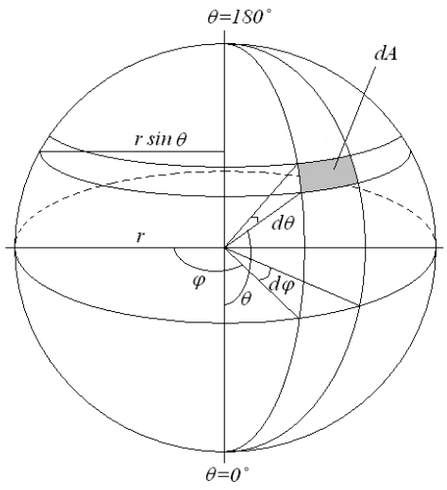
I_v : Kalibre edilen ışık kaynağının ışık şiddeti değeri [cd]

E_v : Işık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

θ : Küresel koordinat sisteminde, başlangıcı lamba merkezinde olan polar açı [°]

φ : Küresel koordinat sisteminde, başlangıcı lamba merkezinde olan azimut açı [°]

r : Küresel yüzeyin yarıçapıdır [m]

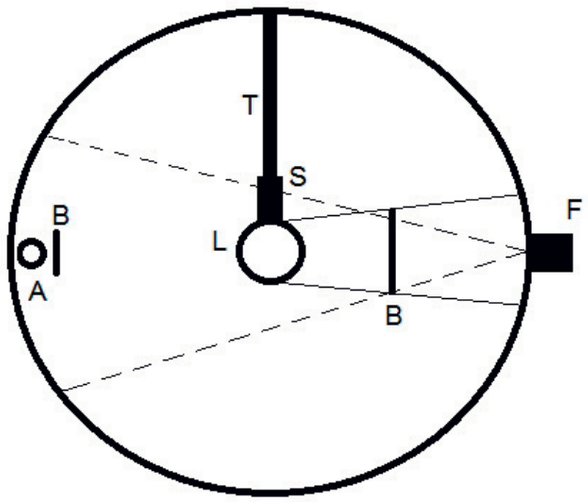


Şekil 411. Bir gonyofotometre ile taranan küresel yüzey [272]

Bu ölçümlerin gerçekleştirilmesi için insan gözü ile benzeşen bir fotometre ve bu fotometreyi küresel koordinatlarda hareket ettirmek için uygun bir konumlama sistemlerine (adım- veya servo-motorlara) ihtiyaç duyulmaktadır. Işık kaynakları çalışma konumunda dış mekanik etkenlere duyarlı olduğundan fotometrik parametreler, titreşim veya hava akımından etkilenebilmektedir. Bu nedenle ölçümlerde kullanılan ışık kaynağının küre merkezinde ve kullanım konumunda (lamba duyu yukarı veya aşağı konumda) sabit tutulması gerekir. Doğru fotometrik değerlerin elde edilebilmesi için fotometre ile ölçülen ışık kaynağı arasındaki uzaklığın ters kareler kuralını sağlayan fotometrik mesafeye eşit veya büyük olması gerekmektedir (ışık kaynağının boyutunun en az 10 katı kadar mesafe). Projektör, otomobil lambaları ve diğer yoğunlaştırılmış ışık sistemleri iç aydınlatmada kullanılan ışık kaynaklarına kıyasla daha uzak mesafelerde ölçülmelidir.

Göreceli Işık Akısı Ölçüm Prensibi

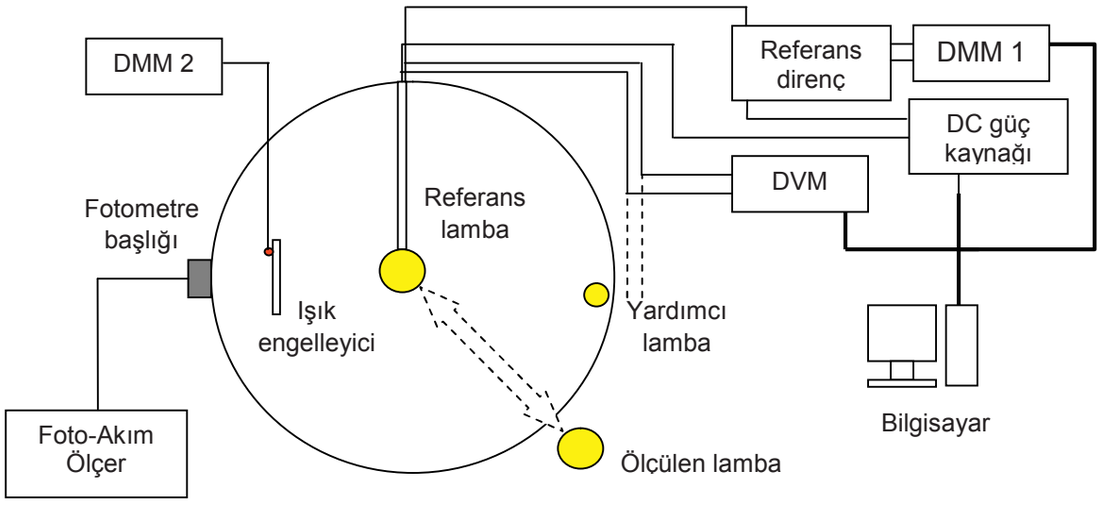
Toplama küresi tabanlı göreceli ışık akısı ölçüm sisteminde, kalibre edilen lambanın ışık akısı değeri, ışık akısı değeri bilinen referans lamba ile kıyaslanarak (yerine-koyma metoduna göre) elde edilmektedir [269]. Ölçümlerde kullanılan toplama küresinin (Şekil 412) iç duvarı ışığı büyük oranda yansıtabilen baryum sülfat veya spektrolon malzeme ile homojen bir şekilde kaplanmalıdır.



Şekil 412. Toplama küresi tabanlı ışık akısı ölçüm prensibi.

L : ölçülen lamba
T : lamba tutucu
A : yardımcı lamba
B : engel
F : fotometre
S : yükseklik ayarlı lamba duyu

Şekil 413'de ışık akısı ölçümlerinin bu yöntemle gerçekleştirilmesi için TÜBİTAK UME'de oluşturulan düzenek verilmektedir [273].



Şekil 413. Toplama küresi tabanlı ışık akısı ölçüm düzeneği.

Bu yöntemle ölçülen bir ışık kaynağının ışık akısı değeri aşağıdaki Eşitlik (253)'e göre elde edilir [268].

$$\Phi_v = \Phi_R \times \frac{E_v}{E_R} \times \frac{E_{SR}}{E_{Sv}} \times \left(\frac{T_v}{T_R}\right)^m \qquad (253)$$

Φ_v : Kalibre edilen ışık kaynağının ışık akısı değeri [lm]

Φ_R : Referans ışık kaynağının ışık akısı değeri [lm]

E_v : Kalibre edilen ışık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

E_R : Referans ışık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

E_{Sv} : Kalibre edilen ışık kaynağının küre içinde yayımlanan ışığı soğurma faktörleri [lx]

E_{SR} : Referans ışık kaynağının küre içinde yayımlanan ışığı soğurma faktörleri [lx]

T_v : Kalibre edilen ışık kaynağının renk sıcaklığı [K]

T_R : Referans ışık kaynağının renk sıcaklığı [K]

m : Renk sıcaklığı için uyumluluk indeksi (tungsten filamanlı lambalar için 0,72)

Eşitlik (253)'e göre yapılan ölçümlerde test edilen lamba referans lamba ile benzer özellikler taşımak zorundadır. Bu özellikler arasında lambaların türü (filamanlı tungsten, flüoresan veya LED), ebatları (çapı küçük olan küreler için küre içerisinde lambanın oluşturacağı gölge lambanın konumu ile doğrudan ilgili olup bu durumdan kaynaklanan hataya yakın-alan absorpsiyonu denilir), çalıştırılma pozisyonları (doğal olarak her bir lambanın yaydığı ışığın çoklu yansımaları farklı olacaktır), ısıl dayanımları (lambadan yayımlanan farklı ısının tüm küre iç yüzeyine farklı bir şekilde dağılması), tayfsal ve uzaysal dağılımları ve küre içi konumlarıdır. Aksi durumda fotometre, lambaların yaratacağı farklı gölgelerin etkisinde kalacaktır.

Küre içerisindeki lambanın fotometre giriş foto-aralığında yaratmış olduğu aydınlık düzeyi, Eşitlik (254)'den görüldüğü gibi kullanılan kürenin çapına (A_k) ve küre içinde kullanılan duvar kaplamasının yansıma faktörüne (ρ) bağlıdır.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A_K} \times \frac{\rho}{1-\rho} \qquad (254)$$

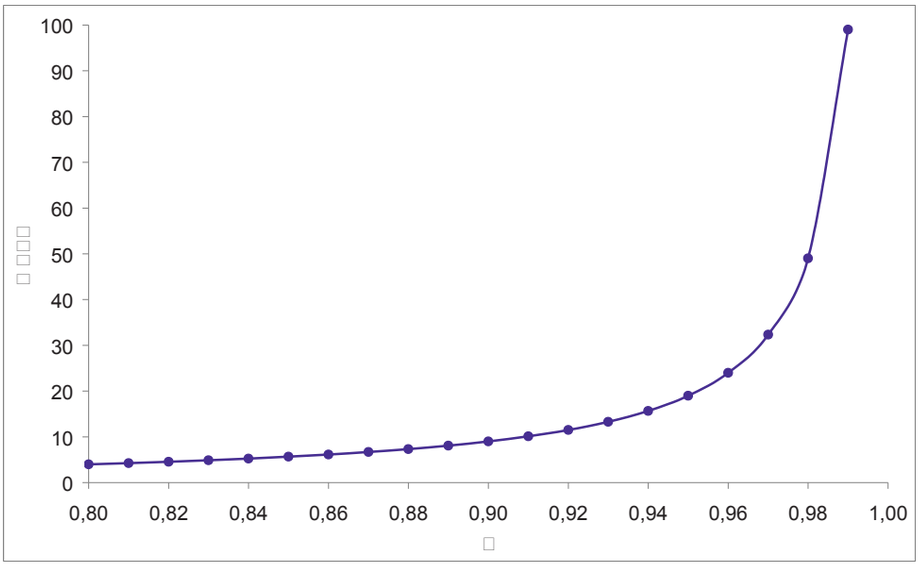
E_v : Işık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

Φ_v : Işık kaynağının ışık akısı değeri [lm]

A_k : Kullanılan kürenin çapı [m]

ρ : Küre içinde kullanılan yansıtıcı kaplama malzemesinin yansıma faktörü

Eşitlikten görüldüğü gibi kürenin çapı büyüdükçe lamba filamanı ile fotometre arası mesafe artacağından aydınlık düzeyi değeri de doğal olarak azalacaktır. Göreceli ölçüm hassasiyeti olarak isimlendirilen Eşitlik (254)'deki ikinci terim, küre iç kaplamanın yansıtma katsayısı ile ilişkilidir. Yüksek yansıma katsayısına sahip bir yüzey için yansıma katsayısındaki dalgaboyuna bağlı küçük değişimler eşitlikten de anlaşıldığı gibi ölçümler üzerinde büyük etkilere neden olacaktır. Bu etki grafiksel olarak Şekil 414'de gösterilmektedir.



Şekil 414. Göreceli ölçüm hassasiyetinin küre iç kaplamasının yansıtma katsayısına göre değişimi

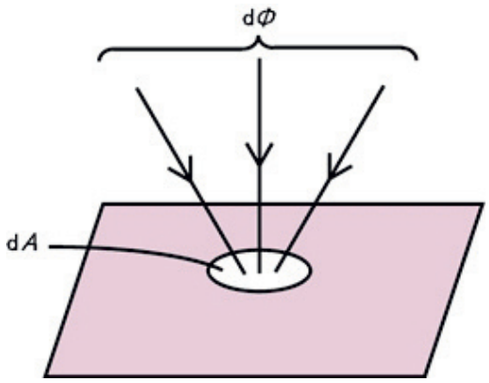
Toplama küresi yöntemine göre ölçülen ışık akısı ölçümlerinde sıcaklık değişimi küre içerisindeki yansımaları ve dolayısıyla da fotometre ile algılanan ışık kaynağının aydınlık düzeyini etkileyeceği için küre içerisindeki sıcaklık, ölçüm süresince izlenmeli ve sıcaklık değişiminin çok artmamasına (< 1 °C) dikkat edilmelidir [269]. Işık kaynağından yayımlanan ısıdan doğrudan etkilenmemesi için sıcaklık-ölçer sensör genelde küre içerisinde kullanılan engelin (Şekil 413) fotometreyi gören yüzeyine tutturulur ve ölçümler kısa sürede tamamlanır.

Toplama küresi tabanlı yönteme göre ışık akısı büyüklüğü, genelde lambalara transfer edilir. Özellikle ışık akısı lambaları olarak gaz-doldurmalı, akkor lambalar kullanılmaktadır. Işık şiddeti lambaları için yapılan ayarlama işlemleri, toplama küresinde gerçekleştirilen ışık akısı lambalarında gerekmez.

7.6.3 AYDINLIK DÜZEYİ

7.6.3.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Aydınlık düzeyi (E_v) birim yüzey veya düzlem üzerine düşen ışık akısı (veya ışık miktarı) yoğunluğudur (Şekil 415) ve Eşitlik (255)'e göre ifade edilir [262].



Şekil 415. Aydınlık düzeyi

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \qquad (255)$$

E_v : Işık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

$d\Phi_v$: ışık akısı [lm]

dA : Yüzey elemanının alanı [m^2]

Aydınlık düzeyi, fotometre, fotometre başlığı, lüksmetre ve spektrofotometre veya spektroradyometre ile ölçülebilir. Bu cihazlardan fotometreler referans standardı, diğerleri ise ağırlıklı olarak çalışma standardı olarak kullanılmaktadır [262]. Teknolojik gelişmeler sonucu ticari olarak üretilen fotometreler eskiden kullanılan ışık şiddeti standart lambalarının yerine fotometrik standartlar olarak tüm dünyada kullanılmaktadır. Araştırmalar göstermiştir ki standart olarak kullanılabilen fotometrelerin hem kısa dönem hem de uzun dönem kararlılığı (~ % 0,1/yıl), standart lambalardan çok daha iyidir.

7.6.3.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Aydınlık düzeyi ölçüm düzeneği, ışık şiddeti ölçüm düzeneği ile (Şekil 409) aynıdır ve aynı ekipman kullanılır. Aydınlık düzeyi ölçer cihazlar, genelde ışık kaynağına yakın bir mesafede ölçüm yapılmaması için tasarlanmıştır [274]. Ayrıca referans düzlemi doğru bir şekilde tanımlanmayan aydınlık düzeyi ölçer, ışık kaynağına çok yakın bir mesafeye getirildiğinde (örneğin 0,5 m altına) ölçüm hatası büyük ölçüde artabilir. Eğer fotometre sıcaklık kontrollü veya sıcaklık göstergeli tip fotometre değilse sıcaklıktan kaynaklanan duyarlılık değişimi etkisinden kaçınmak için bu tarz bir fotometrenin ışık kaynağına çok yakın getirilmemesi gerekmektedir. Buna ilave olarak sıcaklık-kontrollü fotometrelerin de ölçüm öncesi iç bileşenlerin (V(λ)-filtre, foto-aralık ve fotodiyot) dengeye gelebilmesi için birkaç saat önceden çalıştırılması tavsiye edilmektedir.

TÜBİTAK UME'de aydınlık düzeyi ölçümleri 2856 K renk sıcaklığında referans filtre radyometrelerine göre kalibre edilen fotometreler kullanılarak aşağıdaki Eşitlik (256)'e göre ölçülmektedir [275].

$$E_v = y \times s_v^{-1} \tag{256}$$

E_v : Işık kaynağının oluşturduğu aydınlık düzeyi [lx]

y : Fotometre başlığı ile ölçülen fotoakım [A]

s_v : Fotometrenin ışıksal duyarlılığı [A/lx]

Fotometrenin ışıksal duyarlılığı genelde referans bir fotometre kullanılarak birimin transfer edilmesi ile elde edilir. Eşitlik (256) veya referans fotometreye ihtiyaç duyulmadan her bir bileşenin ayrı ayrı karakterize edilmesi ile Eşitlik (257) elde edilir [268].

$$s_v = s_{vref} \times \frac{y}{y_{ref}} \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^m \tag{257}$$

s_v : Fotometrenin ışıksal duyarlılığı [A/lx]

s_{vref} : Referans fotometre başlığının ışıksal duyarlılığı [A/lx]

T : Fotometrenin kalibrasyonunda kullanılan renk sıcaklığı [K]

T_{ref} : Referans fotometre başlığının kalibrasyonunda kullanılan renk sıcaklığı [K]

m : Fotometrenin uyumluluk indeksi

Referans fotometre başlığının ışıksal duyarlılığı, Eşitlik (258) kullanılarak belirlenir.

$$s_{vref} = \frac{A \int_{380}^{780} S(\lambda) R_g(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \times R(555) \tag{258}$$

s_{vref} : Referans fotometre başlığının ışıksal duyarlılığı [A/lx]

A : Fotometre önünde kullanılan fotoaralığın alanı [m^2]

K_m : Maksimum tayfsal ışıksal verimlilik [683 lm/W]

$V(\lambda)$: Fotopik görüş tayfsal verimlilik fonksiyonu

$R_g(\lambda)$: Fotometre başlığının bağıl tayfsal duyarlılığı

$R(555)$: Fotometre başlığının mutlak (555 nm dalga boyunda) duyarlılığı [A/W]

$S(\lambda)$: Lambanın görünür bölgede tayfsal güç dağılımı

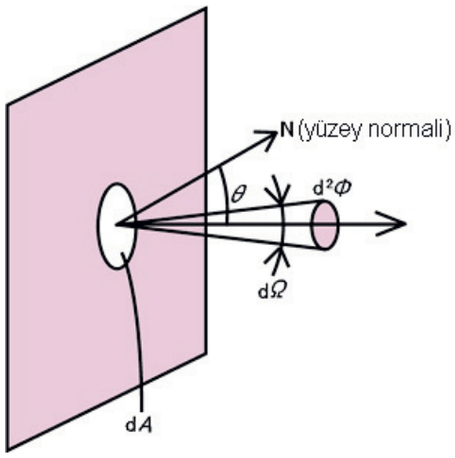
$d\lambda$: Birim dalgaboyu [nm]

Aydınlık düzeyi ölçümleri 6 m uzunluklu fotometrik masa üzerinde lambadan 6 m uzaklıktan lamba boyutunun 10 kat yakınına kadar olan mesafede gerçekleştirilir. Dış ortamda yapılan aydınlık düzeyi ölçümlerinde ise doğrudan lüks değerini gösterebilen kalibreli lüksmetre cihazları kullanılır.

7.6.4 PARILTI

7.6.4.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Parıltı genelde bir kaynağın emisyonunun veya düzgün ve/veya dağınık bir yüzeyden yansımasının ışıksal gücünün belli bir görüş açısı altında olayı izleyen insan gözü tarafından ne kadar algıladığını göstermektedir. Bu nedenle parıltı (L_v), birim yüzeyden birim katı açı altında ve verilen doğrultuda yayımlanan ışık akısıdır veya birim alandan geçen veya yayımlanan ışık miktarı olarak da tarif edilebilir (Şekil 416) ve Eşitlik (259)'a göre ifade edilir [262].



Şekil 416. Parıltı

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA\, d\Omega \cos\theta} \qquad (259)$$

L_v : Parıltı [cd/m^2]

$d\Phi_v$: Birim alandan yayımlanan (geçen veya yansıyan) ışık akısı [lm]

dA : Yüzey elemanının alanı [m^2]

dΩ : Katı açı veya ışığın verilen doğrultudaki yayınlanma açısı [sr]

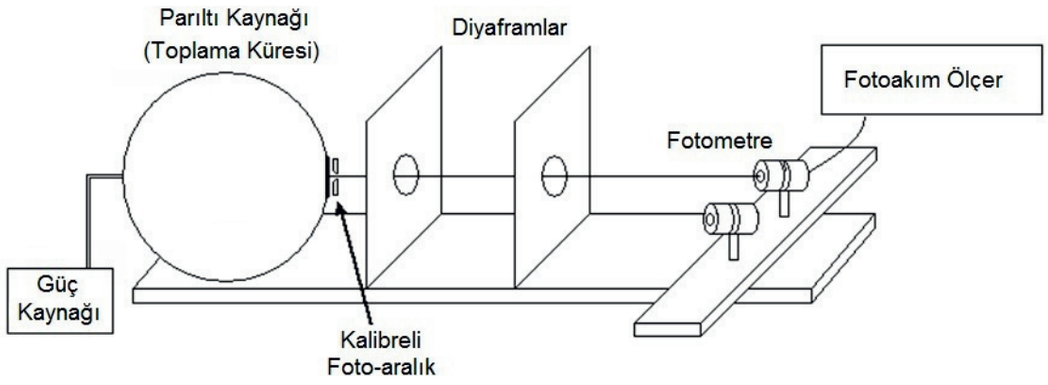
θ : Yüzey normali ve belirlenen doğrultu arasındaki açı [°]

Parıltı SI birimi cd/m^2'dir. İnsan gözü, ~10^{-3} cd/m^2 parıltı seviyesinin üzerinde fotopik görme yani gündüz görme ($V(\lambda)$) fonksiyonuna sahip olduğundan ölçümlerde fotometrik birimlerle radyometrik birimleri birbirlerine bağlayan maksimum tayfsal ışıksal verimlilik K_m= 683 lm/W olarak ele alınır. Ancak göz ~10^{-3} cd/m^2 parıltı seviyesinin altında skotopik ($V'(\lambda)$-gece görme) fonksiyonuna sahip olduğundan bu koşul için gerçekleştirilen ölçümlerde maksimum tayfsal ışıksal verimlilik K_m'=1700 lm/W olarak ele alınır [276].

7.6.4.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Parıltı ölçümleri genelde gösterge ünitelerinin parıltısını (veya fotometrik parlaklığını) ayarlamak için ekran üretimi veya görüntü işleme teknolojisinde kullanılır.

TÜBİTAK UME'de bir yüzeyin parıltı değeri referans fotometre ve yüzeye uygun kalibreli foto-aralık kullanılarak Şekil 417'de gösterilen fotometrik ölçüm düzeneğinde gerçekleştirilmektedir [268].



Şekil 417. Parıltı ölçüm düzeneği

Şekil 417'de görüldüğü gibi herhangi bir parıltı kaynağının parıltı değeri, parıltı kaynağı çıkışına konulan ve alanı bilinen kalibreli foto-aralık sayesinde kaynaktan belli bir uzaklıkta referans fotometre ile ölçülmektedir. Kaçak ışıkların ölçüm üzerindeki etkisini engellemek için diyaframlar kullanılmıştır. Parıltı kaynağı içerisinde kullanılan ışık kaynağının ve küre içi yansımaların kararlı duruma gelebilmesi için ölçümler öncesi en az 30 dakika beklenmelidir. Parıltı Eşitlik (260)'daki gibi de ifade edilebilir

$$L_V = \frac{k \times I}{A} = \frac{k \times E \times d^2}{A} = \frac{k \times y \times d^2}{s_V \times A} \times \left(\frac{T}{2856}\right)^m \qquad (260)$$

L_v : Parıltı [cd/m^2]

k : geometrik düzeltme katsayısı

I : Parıltı kaynağının ışık şiddeti [cd]

A : Ölçümü gerçekleştirilen parıltı kaynağının önündeki foto-aralığın alanı [m^2]

E : Parıltı kaynağından d mesafede elde edilen aydınlık düzeyi [lx]

d : Parıltı kaynağı önünde kullanılan foto-aralık ile ölçümlerde kullanılan referans fotometrenin foto-aralığı arasındaki mesafe [m]

y : Fotometre çıkışında ölçülen fotoakım [A]

s_v : Fotometre başlığının ışıksal duyarlılığı [A/lx]

T : Ölçümü yapılan parıltı kaynağının renk sıcaklığı [K]

m : Renk sıcaklığı için uyumluluk indeksi

Eşitlik (260)'da verilen geometrik düzeltme katsayısı Eşitlik (261) ile bulunur [277].

$$k = 1 + \left(\frac{r_a}{d}\right)^2 + \left(\frac{r_f}{d}\right)^2 \qquad (261)$$

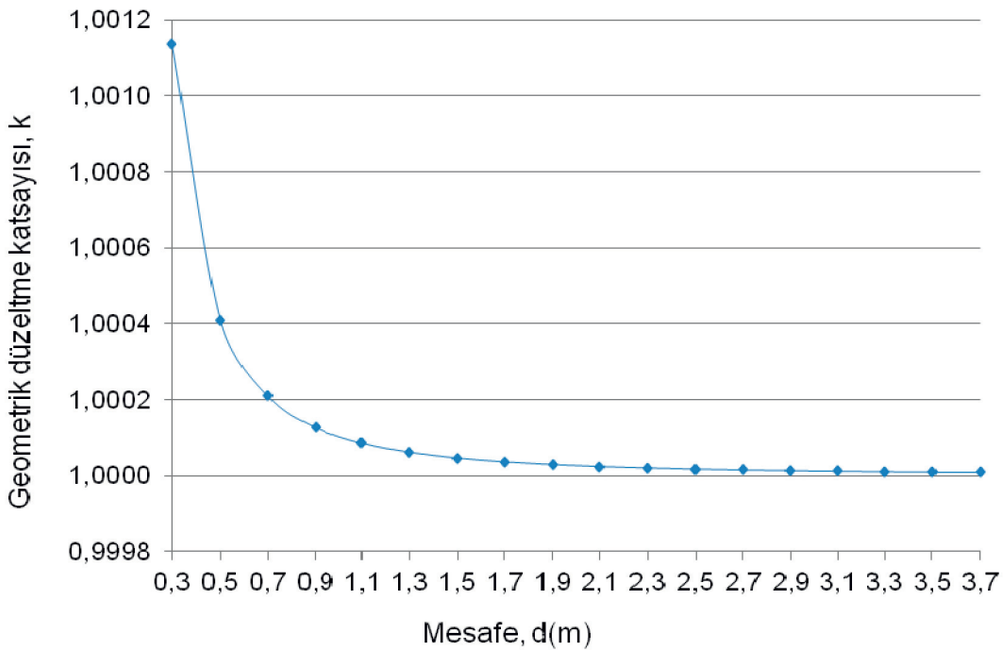
k : Geometrik düzeltme katsayısı

r_a : Parıltı kaynağı önünde kullanılan foto-aralığın yarıçapı [m]

r_f : Fotometre başlığının sahip olduğu foto-aralığın yarıçapı [m]

d : Parıltı kaynağı önünde kullanılan foto-aralık ile ölçümlerde kullanılan referans fotometre başlığının foto-aralığı arasındaki mesafe [m]

Doğru ölçümler için her iki yarıçapın da d/10'dan küçük olması gerekmektedir. Eğer parıltı kaynağı önünde 20 mm çapa sahip foto-aralık (r_a = 0,010 m) ve fotometre önünde 3 mm çapa sahip foto-aralık (r_f = 0,0015 m) kullanıldığını düşünürsek 1 m mesafede her iki yarıçap d/10 şartını sağlayacaktır. Bu değerleri kullanırsak Eşitlik (261)'e göre k = 1,0001 olacaktır ve bu değerin parıltı değeri üzerindeki etkisi ~% 0,02 düzeyinde olacaktır. Geometrik düzeltme katsayısının mesafeye bağlı değişimi Şekil 418'de verilmiştir.



Şekil 418. Mesafeye bağlı geometrik düzeltme katsayısı değişimi

Şekilde görüldüğü gibi eğer mesafeyi kısaltırsak k değeri artacak ve dolayısıyla da parıltı değeri bu katsayıdan etkilenecektir (0,25 m'de ~ % 0,3). Eğer mesafe 2 m üzerine çıkarsa bu katsayının parıltı değeri üzerindeki etkisi dikkate alınmayacak kadar düşük olacaktır. Dolayısıyla bu katsayı değişimleri dikkate alındığında, parıltı ölçümlerinin ≥ 2 m 'de alınması gerekmektedir.

Oluşturulan ölçüm düzeneği sayesinde bir yüzeyin parıltı değerinin ölçülmesinin yanı sıra standart parıltı kaynaklarının (toplama kürelerinin), parıltı-ölçer cihazların ve dağınık geçirgen cam veya plastik gibi standart numunelerin parıltı katsayısı ($q = L_v/E_v$) karakterizasyonu yapılabilmektedir [277].

7.6.5 OPTİK GÜÇ

7.6.5.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Optik radyometride en temel ve yaygın ölçüm birimi olan optik güç (ışınım gücü) ölçülen elektromanyetik radyasyonun (elektromanyetik tayfın kızılötesi, görünür ve morötesi bölgelerini kapsayan) toplam gücünü ifade eder, yani Eşitlik (262)'de belirtildiği gibi birim zamandaki yüzeyden yayımlanan enerjidir

$$P = \frac{dQ}{dt} \qquad (262)$$

P : Güç [W]

Q : Enerji [J]

t : Zaman [s]

Optik gücün SI ölçüm birimi Watt'tır (W=J/s). Yani 1 saniyede 1 Joule enerji yayımlayan bir ışınım kaynağının optik gücü 1 W olacaktır. Eğer yayımlanan ışınım gücünü zamana bağlı olarak entegre edersek bu durumda kaynağın toplam enerjisi elde edilir. Eğer elektromanyetik radyasyon tayfsal olarak inceleniyorsa bu durumda ölçülen büyüklük tayfsal optik güç $P(\lambda)$ ve birimi ise W/nm olacaktır. TÜBİTAK UME'de SI birimi Watt cinsinden ölçülebilen optik güç seviyeleri ve bunların 10'un katları şeklindeki isimlendirmeleri Tablo 46'da verilmiştir.

Tablo 46. TÜBİTAK UME'de ölçülebilen optik güç seviyeleri

Değer	Simge	İsim
10^{0} W	W	Watt
10^{-3} W	mW	Milliwatt
10^{-6} W	µW	Microwatt
10^{-9} W	nW	Nanowatt
10^{-12} W	pW	Picowatt

Özellikle radyo, mikrodalga ve fiber optik iletişimde ölçülen mutlak optik güç büyük veya küçük değerlerle ifade edildiğinden bu tip alanlarda optik güç Watt cinsinden değil Desibel ölçeğine geçilerek küçük optik güç, 1 mW orantılanması ile elde edilen dBm ile ifade edilir. Yüksek optik güçler için dBW olarak ifade edilen oranda referans değer olarak ise 1000 mW ele alınır. Optik gücün Watt'tan dBm'e dönüştürülmesi veya tersi durumu Eşitlik (263) ile sağlanmaktadır.

$$x = 10\log_{10}(1000P) \qquad P = \frac{10^{(x/10)}}{1000} \qquad (263)$$

x : Güç oranı [dBm]

P : Optik güç [W]

Buna göre;

0 dBm = 1 mW.

7.6.5.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Dar açıda ışıma yapabilen bir ışınım kaynağının (örneğin lazer ışınımının) toplam optik gücü düzlemsel bir algılayıcı kullanılarak belirlenebilir. Bu durumda ışınım kaynağının yayımladığı radyasyon demetinin, algılayıcının efektif alanını tamamen doldurmaması yani efektif alanın altında kalması koşulu sağlanmalıdır. Ancak tüm doğrultulara 4π sr ışıma yapabilen bir ışınım kaynağının toplam optik gücünü belirlemek için genelde toplama küresi kullanılması gerekmektedir.

Optik ölçümlerde kullanılması için tasarlanan ilk mutlak radyometreler Angstrom ve Kulbraum tarafından bağımsız olarak geliştirildi [278]. Angstrom özellikle metroloji alanında yer yüzeyindeki güneş ışınımını ölçmek için, buna karşılık Kurlbaum radyometrik tabanlı ışık şiddeti birimi standardını oluşturmak için yaptıkları radyometreleri kullandılar. Deneylerin amaçları farklı olmasına rağmen, radyometrelerin ikisi de ısıl dedektör tabanlı, elektriksel yerine koyma ilkesi ile çalışan radyometrelerdir. Bu tip radyometrelerde herhangi bir ışıma kaynağının optik gücünü ölçmek için elektriksel parametrelerden faydalanılır. Çünkü herhangi bir devreden geçen elektriksel akımı ve bu devre elemanı üzerindeki gerilim düşmesinden faydalanarak elektriksel güç ölçümünü gerçekleştirmek mümkündür. Elektriksel güçten faydalanma yönteminde radyometrenin detektörü üzerinde optiksel ve elektriksel olarak aynı ısıl etkiler yaratılarak optik güç bulunur. Diğer bir değişle radyometrenin dedektörünün optik güce karşı sıcaklık tepkisi ölçülür ve aynı sıcaklığı verebilecek elektriksel güç bulunur. Bu prensiple çalışan radyometrelere elektriksel yerine koyma prensibi ile çalışan radyometreler denir.

Elektriksel yerine koyma prensibi ile çalışan radyometreler yirminci yüzyılda geliştirilerek dedektör tabanlı radyometrik ölçekleri oluşturmak için en çok kullanılan cihazlar olmuştur. Fakat bu radyometrelerin performansları malzemelerin 293 K'deki termodinamik özellikleri ile sınırlı kalmış ve en iyi belirsizlik değeri, % 0,1 ile % 0,3 arasında elde edilmiştir [262].

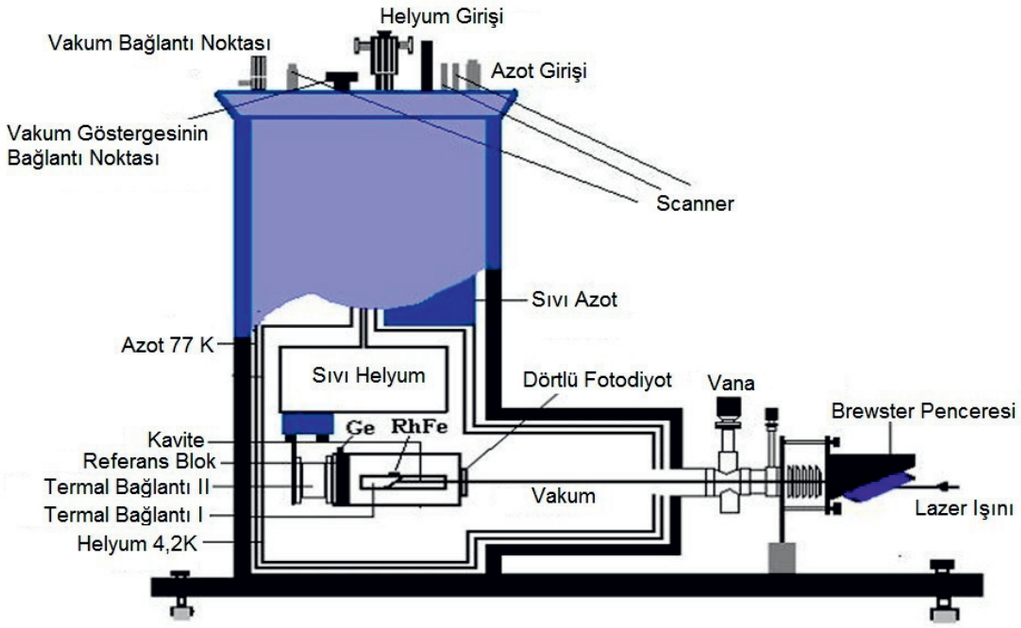
Metroloji, uzay, telekomünikasyon, aydınlatma, savunma, sağlık gibi endüstrilerin ihtiyaç duyduğu hassasiyette optik ölçümleri gerçekleştirebilecek ölçüm sistemi ve yöntemlerine yönelik iki önemli yaklaşım ön plana çıkmaktadır. İlk yaklaşım, Geist ve Zalewski tarafından Amerika'nın Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nde (NIST) geliştirilen "Self-calibration" olarak adlandırılan tekniktir [263]. Özel olarak üretilmiş fotodiyotların iç kuantum kayıpları "Self-calibration" tekniği ile sıfıra indirgenerek tayfsal duyarlılıkları yansıma ve teorik duyarlılık değerleri ile hesaplanabilir. Tayfsal duyarlılığı bilinen bu algılayıcılar ile optik güç ölçümleri % 1,0'den düşük bir belirsizlikle hesaplanabilmektedir. İkinci yaklaşım düşük sıcaklık (kryojenik) radyometresi olmuştur. NIST'te, Ginnings ve Reilly tarafından, siyah cisim radyometresinden yayılan ışınım akısını ölçmek için ısı akış kalorimetresi kullanarak düşük sıcaklık radyometre sistemi geliştirildi [278]. Bu radyometre sistemi ile optik güç ölçümleri kırınım ve saçılmadan dolayı büyük ölçüde başarılı bir şekilde gerçekleştirilememesine rağmen böyle bir cihaz potansiyelinin olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, yaklaşık olarak aynı zamanlarda, Avustralya Ulusal Ölçüm Laboratuvarı (NMIA)'nda, Blevin ve Brown tarafından altının donma noktası sıcaklığındaki siyah cisim ışıma radyometresi ve elektriksel yerine koyma prensibi ile çalışan radyometre kullanılarak Stefan Boltzmann sabitinin % 0,1'den küçük bir belirsizlikle gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir [280].

NIST ve NMIA'deki çalışmalardan esinlenen Quinn ve Martin tarafından İngiltere Ulusal Fizik Laboratuvarı (NPL)'nda ilk başarılı toplam ışınım termometresi yapılmıştır [281]. Bu termometre ile termodinamik sıcaklık -130 °C ile 100 °C aralığında birkaç mK belirsizlikle gerçekleştirilebilmiştir. Aynı zamanda bu sistem ile radyometri alanında Boltzmann sabitinin % 0,017 gibi bir belirsizlikle gerçekleştirilebilmesi, bu sistemin optik güç ölçümlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sistem, lazer kaynaklarının optik güç ölçümlerini gerçekleştirebilecek şekilde geliştirilerek standart radyometreye göre 1000 kat daha duyarlı olan, sıvı helyum sıcaklığında

(4,2 K) çalışan lazer tabanlı Krayojenik radyometre sistemi elde edilmiştir. Metroloji enstitülerinde optik güç ölçeğini düşük bir belirsizlikle oluşturmak, yani optik güç ölçümlerini yüksek doğrulukta gerçekleştirmek için bu tür radyometre sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

TÜBİTAK UME Birincil Seviye Mutlak Optik Güç Ölçüm Sistemi

TÜBİTAK UME'de lazer kaynaklarının mutlak optik gücü birincil seviye Şekil 419'da verilen Krayojenik Radyometre sistemi kullanılarak ölçülmektedir [282]. Krayojenik radyometre içerisinde yer alan kavitenin termal ısısını düşürmek, yüksek sıcaklıklardaki konveksiyon, ışıma ve elektriksel dirençlerden kaynaklanan elektriksel ısı kayıplarını azaltmak için ölçümlerden en az üç gün öncesinde sistem hacmi vakum altına alınmaktadır. Rotary ve turbo moleküler pompa sistemleri ile 10^{-5} Pa (10^{-7} Torr) basınç seviyesine vakum edildikten sonra, radyometre iç haznesi sıvı helyum (4,2 K) ve dış haznesi ise sıvı azot (77 K) ile doldurulmaktadır.



Şekil 419. Birincil seviye krayojenik radyometre

Optik güç ölçümlerinin yüksek doğrulukta yapılabilmesi, radyometrenin düşük sıcaklıklardaki termodinamik performansı ve kullanılan ışıma kaynaklarının optik özelliklerine bağlıdır. Polikromatik ışıma kaynaklarına göre kararlı ve doğrusal ışıma demetine sahip olmaları nedeniyle lazer ışıma kaynaklarının ışınları kolayca yönlendirilerek radyometre kavitesinin içerisine düşürülebilmektedir. Fakat lazer ışıma kaynaklarının bu özellikleri optik radyometrisi alanında beklenen yüksek doğruluklu optik güç ölçümleri için yeterli gelmemektedir. Lazer ışıma kaynaklarının optik güçlerindeki salınımlar ve ışınların geometrik profileri optik güç ölçümlerinin yüksek doğrulukta yapılmasını etkileyen önemli faktörlerdir. Lazer ışıma kaynaklarının optik güçlerindeki salınımları azaltmak ve Gaussian dağılımlı düzgün profili bir ışın demetini oluşturmak için lazer güç kararlaştırıcı (LPS, laser power stabilizer system) sistemi kullanılmaktadır. LPS bir elektro-optik modülatör (EOM), sıcaklık kontrollü monitör fotodiyot ve kontrol elektroniğinden oluşur. EOM birimi üzerine düşürülen lazer ışını, sıvı kristalden ve kutuplayıcı ışın ayırıcıdan geçerek kutuplanır. EOM'den çıkan ışın demeti "wedge" şekilli yansıtıcı tarafından kısmen yansıtılır ve elektrik sinyaline dönüştüren monitör fotodiyota yönlendirilir. Sinyal işleme birimi ışının iletilmesini sağlamak ve sabit bir sinyal çıkışı elde etmek için bu sinyali EOM'e geri gönderir. Bu teknik ile yaklaşık 30 dakika içerisinde ~ 10^{-5} seviyesinde kararlı bir ışın demeti elde edilir.

Lazer ışınının uzaysal profili (3 mm çapında Gauss ışını), mikroskop, küçük çaplı delik (25 µm çapında) ve mercek kombinasyonları kullanarak ayarlanabilmektedir [282]. Mikroskop ile lazer ışını deliğinin önüne odaklayarak ışığın delikten kırınım desenleri şeklinde geçmesi sağlanır. Kırınım deseni merkezde aydınlık, etrafında karanlık ve aydınlık saçaklar şeklindedir. Ölçümlerde kullanılacak olan ışın, merkezdeki aydınlık saçaktır. Bu aydınlık saçağın çapı, delikten geçen kırınım deseni şeklindeki ışınları doğrusal ışın demeti haline getirmek için önüne yerleştirilen mercek ile ayarlanabilmektedir.

Kararlı hale getirilen lazer ışınımı radyometre giriş penceresinin arkasında He sıcaklığına kadar soğutulan ortamda bulunan kavite içerisine geliştirilen teknikle düşürülmektedir ve kavite girişinde bulunan dörtlü-fotodiyotla merkez doğrulaması yapılmaktadır [282].

Elektriksel yerine koyma prensibi ile çalışan bir radyometre ile optik güç ölçülürken radyometre kavitesi üzerinde optiksel ve elektriksel olarak aynı ısıl etkiler yaratılmaktadır. Diğer bir değişle radyometre kavitesinin ölçümler öncesi optik güce karşı sıcaklık tepkisi ölçülerek belirlenir ve aynı sıcaklığı verebilecek elektriksel güç bulunur. Optiksel ve elektriksel olarak aynı sıcaklık elde edildiği için optik güç elektriksel güce eşitlenebilir yaklaşımı ile optik güç değeri elde edilir. Pratikte, optiksel ve elektriksel olarak aynı sıcaklık değerlerini elde etmek mümkün değildir. Bunun yerine, yaygın olarak optik güç ölçümlerini gerçekleştirmek için statik yerine koyma yöntemi kullanılmaktadır. Statik yerine koyma yöntemindeki amaç, kavite üzerinde bulunan dirençler ile radyometre kavitesinin 4,2 K'deki duyarlılığı oranında optiksel sıcaklığın üstünde ve altında elektriksel sıcaklıklar elde edebilecek elektriksel güç uygulamak ve bu verilerin interpolasyonu ile optik sıcaklığa karşılık gelen optik gücü hesaplamaktır. Bu nedenle optik güç ölçümleri öncesinde kavitenin elektriksel güce karşı tepkilerini ölçerek kavitenin duyarlılığı belirlenir. Ayrıca statik yerine koyma yönteminde, bir ölçüm döngüsü birbirleriyle aynı olan üç optiksel ve optiksel sıcaklığın biraz üstünde ve altında yer alan iki elektriksel sıcaklıklardan oluşmaktadır.

Statik yerine koyma yöntemi ile bir ölçüm döngüsü çerçevesinde optik gücü hesaplamak için uygulanan işlemler şu şekildedir:

1. Lazer ışınımı kavite içerisine düşürülerek optiksel sıcaklık (T_{op1}) kaydedilir.
2. Lazer ışınımı kesilerek optiksel sıcaklık değerinin altında sıcaklık verebilecek elektriksel güç uygulanır ve elektriksel sıcaklık ve elektriksel güç değerleri (T_{L1}, P_{L1}) kaydedilir.
3. Elektriksel güç kesilerek lazer ışınımı kavite içerisine ikinci kez düşürülür ve optiksel sıcaklık (T_{op2}) tekrar kaydedilir.
4. Lazer ışınımı kesilerek optiksel sıcaklık değerinin üzerinde sıcaklık verebilecek elektriksel güç uygulanır ve elektriksel sıcaklık ve elektriksel güç (T_{H1}, P_{H1}) kaydedilir.
5. Elektriksel güç tekrar kesilerek lazer ışınımı kavite içerisine üçüncü kez düşürülür ve optiksel sıcaklık (T_{op3}) kaydedilir.
6. Lazer ışınımı kesilerek optiksel sıcaklık değerinin altında sıcaklık verebilecek elektriksel güç uygulanır ve elektriksel sıcaklık ve elektriksel güç değerleri (T_{L2}, P_{L2}) kaydedilir.
7. Elektriksel güç kesilerek lazer ışınımı kavite içerisine ikinci kez düşürülür ve optiksel sıcaklık (T_{op4}) tekrar kaydedilir.
8. Lazer ışınımı kesilerek optiksel sıcaklık değerinin üzerinde sıcaklık verebilecek elektriksel güç uygulanır ve elektriksel sıcaklık ve elektriksel güç (T_{H2}, P_{H2}) kaydedilir.
9. Elektriksel güç tekrar kesilerek lazer ışınımı kavite içerisine üçüncü kez düşürülür ve optiksel sıcaklık (T_{op5}) kaydedilir.

Bir döngü içerisindeki optik güç Eşitlik (264) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{op} = \frac{1}{3}\left\{\left[P_{L1} + \frac{P_{H1} - P_{L1}}{T_{H1} - T_{L1}}\left(\sum_{j=1}^{3}\left(T_{op,j}/3\right) - T_{L1}\right)\right] + \left[P_{H1} + \frac{P_{L2} - P_{H1}}{T_{L2} - T_{H1}}\left(\sum_{j=2}^{4}\left(T_{op,j}/3\right) - T_{H1}\right)\right] + P_{L2} + \frac{P_{H2} - P_{L2}}{T_{H2} - T_{L2}}\left(\sum_{j=3}^{5}\left(T_{op,j}/3\right) - T_{L2}\right)\right\} \quad (264)$$

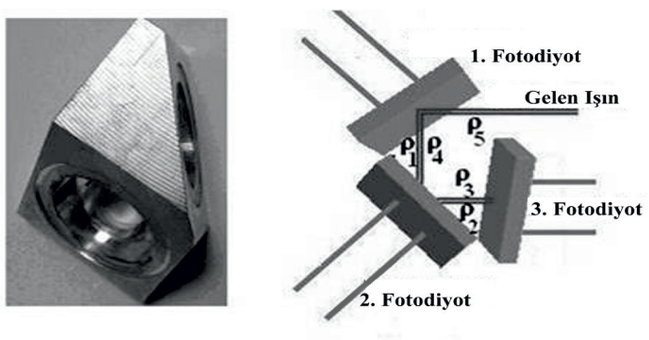
P_{op} : Optik güç [W]
P_{Li} : Elektriksel güç [W]
P_{Hi} : Elektriksel güç [W]
T_{Li} : Elektriksel güç uygulandığında okunan sıcaklık [K]
T_{Hi} : Elektriksel güç uygulandığında okunan sıcaklık [K]
T_{opj} : Optik güç uygulandığında okunan sıcaklık [K]

Optik ışınım radyometre içine girdiğinde saçılma $S(\lambda)$, radyometre girişindeki camın geçirgenliği $T(\lambda)$ ve kusurlu kavite soğurması $A(\lambda)$ nedeniyle azalabilir [274]. Bu nedenle bu parametreler de ölçülerek ölçüm sonucuna Eşitlik (265)'de verildiği gibi ilave edilmelidir.

$$P_{corr.op}(\lambda) = \frac{1}{T(\lambda)}\left[\frac{P_{op}(\lambda)}{A(\lambda)} + S(\lambda)\right] \quad (265)$$

$P_{corr.op}(\lambda)$: Düzeltilen optik güç [W]
$P_{op}(\lambda)$: Optik güç [W]
$S(\lambda)$: Optik ışınım radyometre içine girdiğinde oluşan saçılma
$T(\lambda)$: Radyometre girişindeki camın geçirgenliği
$A(\lambda)$: Kusurlu kavite soğurması

Düşük sıcaklık radyometresi ile ölçülen optik gücü, radyometride kullanılan ısıl ve foton tabanlı dedektörlere aktarmak için Şekil 420'de gösterilen transfer standardı olarak foton tabanlı 3-adet 10 mm x 10 mm ebatında ve ön koruma camsız silikon fotodiyotlardan oluşan yansıma tipi tuzak dedektör tasarımlanmış ve kullanılmaktadır [283].

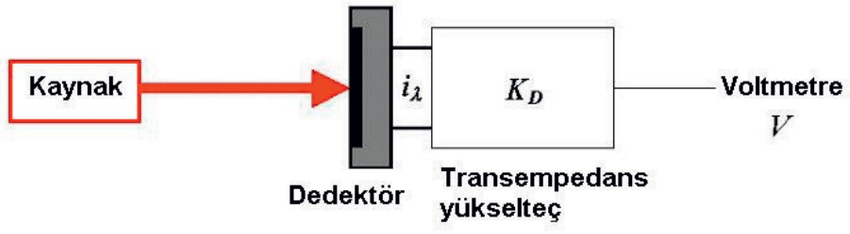


Şekil 420. Yansıma tipi silikon fotodiyot tabanlı tuzak dedektörün geometrik dizilimi.

Yapı içerisindeki iki foto diyotun ön yüzeyleri ışın demetiyle 45° açı yapacak şekilde üçüncüsü ise ışın demetine dik bir şekilde monte edilmektedir. Dolayısıyla, tuzak dedektör içerisine düşen ışın demeti beş yansımaya maruz kalır; ikisi dik polarizasyonun yüzeyi ile 45° açı, ikisi paralel

polarizasyonun yüzeyi ile 45° açı ve biri de yüzeyin normaline paralel açı ile yansımaktadır. Böylece, bu süreçte ışının çoğu fotodiyotlar tarafından soğurulur ve geri kalan ışın aynı yoldan geri döner. Tuzak dedektör iç ve dış kuantum verimleri, yansıma kayıpları, kutuplanma bağımlılığı, doğrusallıktan sapma özellikleri açısından tek elemanlı foton ve ısıl tabanlı dedektörlere göre oldukça yüksek performans gösterir. Tuzak dedektörünün üretimindeki amaç, fotodiyotlardaki yüksek yansıma kayıplarını azaltarak dış kuantum verimliliğini artırmak ve duyarlılığın kutuplanma bağımlılığını ortadan kaldırmaktır.

Düşük sıcaklık radyometresi ile gerçekleştirilen ışınım akısını transfer standardı tuzak dedektöre aktarmak için optik güç ölçümlerinin hemen ardından tuzak dedektör lazer ışını önüne taşınarak optik güce karşı tepkisi fotoakım olarak ölçülmektedir. Dedektörde elde edilen fotoakım, akım-gerilim dönüştürücüsü (transempedans yükselteç) yardımı ile gerilime dönüştürülmektedir. Bir dedektörün optik güce karşı akım/gerilim, sıcaklık veya direnç değişimi cinsinden tepkisi duyarlılık olarak adlandırılır ve duyarlılık değeri, Şekil 421'de verilen düzenek ile ölçülen gerilim değerinin Eşitlik (265)'de elde edilen ışınım akısına bölünmesi ile hesaplanmaktadır (Eşitlik (266)).



Şekil 421. Dedektör duyarlılığının belirlenmesi

$$R = \frac{V / K_D}{P} \qquad (266)$$

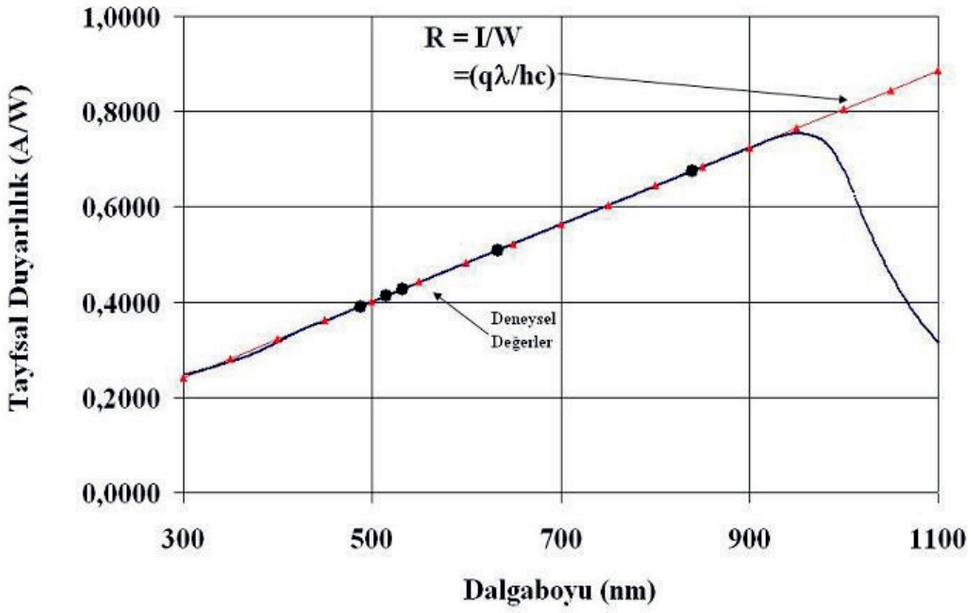
R : Dedektör duyarlılığı [A/W]
V : Ölçülen gerilim [V]
K_D : Akım-gerilim dönüştürücüsünün kazancı [V/A]
P : Ölçülen ışınım akısı [W]

Bu şekilde elde edilen duyarlılık değerleri optik güç ölçümlerinde kullanılan lazer dalga boyları ile sınırlandırılmıştır. Duyarlılık ölçeğini dedektörün duyarlı olduğu dalgaboyu aralığında oluşturmak için duyarlılık değeri, dalgaboyu fonksiyonu olarak ifade edilmelidir. Dedektör duyarlılığı yansıma ve iç kuantum yetersizliğinin fonksiyonu olarak Eşitlik (267)'deki gibi ifade edilebilir [283].

$$R(\lambda) = [1 - \rho(\lambda)][1 - \delta(\lambda)]\frac{e\lambda}{hc} \qquad (267)$$

$R(\lambda)$: Dedektör duyarlılığı [A/W]
e : Temel elektrik yükü [Coulomb]
λ : Vakum içindeki dalga boyu [nm]
h : Planck sabiti [$6{,}6260693 \times 10^{-34}$ J s]
c : Vakum içindeki ışığın hızı [$2{,}99792458 \times 10^{8}$ m/s]
$\rho(\lambda)$: Tayfsal yansıma
$\delta(\lambda)$: Tuzak dedektörün iç kuantum yetersizliği
$[1- \delta(\lambda)]$: İç kuantum verimliliği

Eşitlik (267)'ye göre belirlenen dedektörün tayfsal duyarlılığı kuantum verimliliği ve yansıma parametreleri modellenerek elde edilmektedir (Şekil 422).



Şekil 422. Silikon fotodiyodun tayfsal duyarlılığı

Çalışma standardı dedektörler foton ve ısıl dedektörler olmak üzere iki guruba ayrılırlar [284]. Isıl dedektörler (Bolometreler ve termistörler, ısılçiftler, kalorimetre, piroelektrik) ve foton dedektörler (Fotoemisif, katı hal dedektörler (Si, Ge, GaAs, InAs, PbSe, GaAs, InGaAs)).

Isıl dedektörler üzerine düşen ışınım akısının soğurulması ile oluşan sıcaklık veya direnç değişimini algılayan dedektörlerdir. Bu dedektörlerin çalışması bir parça metalin ısınması prensibine dayandığı için ışınım akısına karşı tepkileri oldukça yavaştır ve bu dedektörlerde yüksek hassasiyette ölçüm beklenemez, çünkü ölçülebilen bir gerilim farkı yaratabilmek için çok büyük sayıda foton gerekmektedir. Bundan dolayı ısıl dedektörler gelen fotonun dalga boyundan bağımsız duyarlılığa sahiptirler ve bu özellik dedektörlerin birçok lazer ve diğer ışıma kaynaklarının güç ölçümlerinde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu tip dedektörlerin bir diğer avantajı ise bu dedektörlerin zayıflatıcı kullanılmadan yüksek güç seviyelerinde kullanılabilmesidir. Birkaç watt seviyesindeki optik güç ölçümleri bu dedektörler ile problemsiz ölçülebilir ve genelde kızılötesi dalga boylarında kullanılır. Isıl dedektörler genellikle sabit duyarlılığa sahip oldukları için belirli dalga boylarında duyarlılık ölçümleri gerçekleştirildikten sonra yansıma ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak duyarlılık değerleri geniş bir dalgaboyu aralığında elde edilebilir [285]. Krayojenik radyometre ile ölçülen optik güç ısıl dedektörlere iki farklı şekilde akatarılabilmektedir. Isıl dedektörlerin düşük sıcaklık radyometre sisteminde, optik güç ölçümlerinin yapıldığı lazer dalgaboylarında, ölçülen optik güce karşı tepkileri ölçülerek ya da duyarlılık ölçüm sisteminde transfer standardı tuzak dedektör ile karşılaştırarak duyarlılıkları elde edilebilmektedir. Metroloji enstitülerinde yaygın olarak ikinci yöntem tercih edilir. Bu yöntemde transfer standardı tuzak dedektör ile ısıl dedektörlerin lazer dalgaboylarındaki ışınım akılarına karşı tepkileri ölçülüp (R_m) aşağıdaki ifade kullanılarak ısıl dedektörlerin duyarlılıkları hesaplanır. Isıl dedektörler teorik olarak sabit duyarlılığa sahip olmasına rağmen kısmen de olsa ön yüzeylerindeki yansımalar nedeniyle duyarlılıkları dalgaboyuna bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Bu dedektörlerin yansıma (ρ) ve geçirgenliğe (τ) bağlı duyarlılık değerleri Eşitlik (268)'deki gibi ifade edilmektedir [285].

$$R(\lambda) = (1-\rho(\lambda)) \times (1-\tau(\lambda)) \times R_m \quad (268)$$

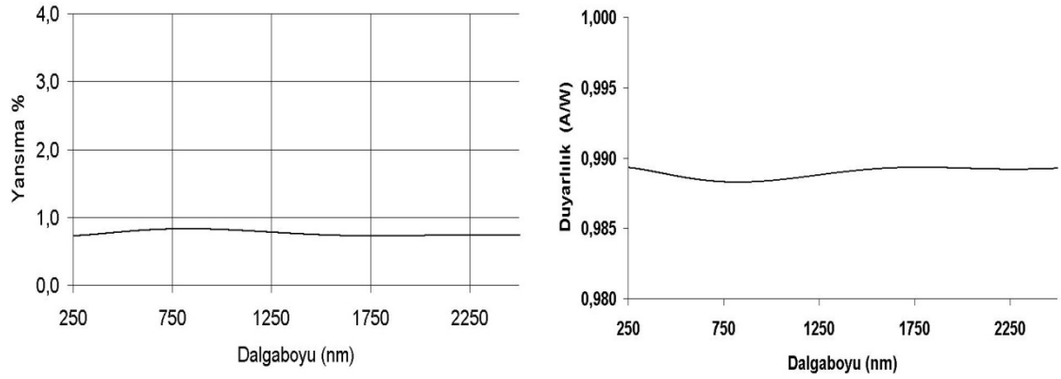
$R(\lambda)$: Isıl dedektör duyarlılığı [A/W]

$\rho(\lambda)$: Dedektörün ön yüzeyindeki yansıma

$\tau(\lambda)$: Geçirgenlik

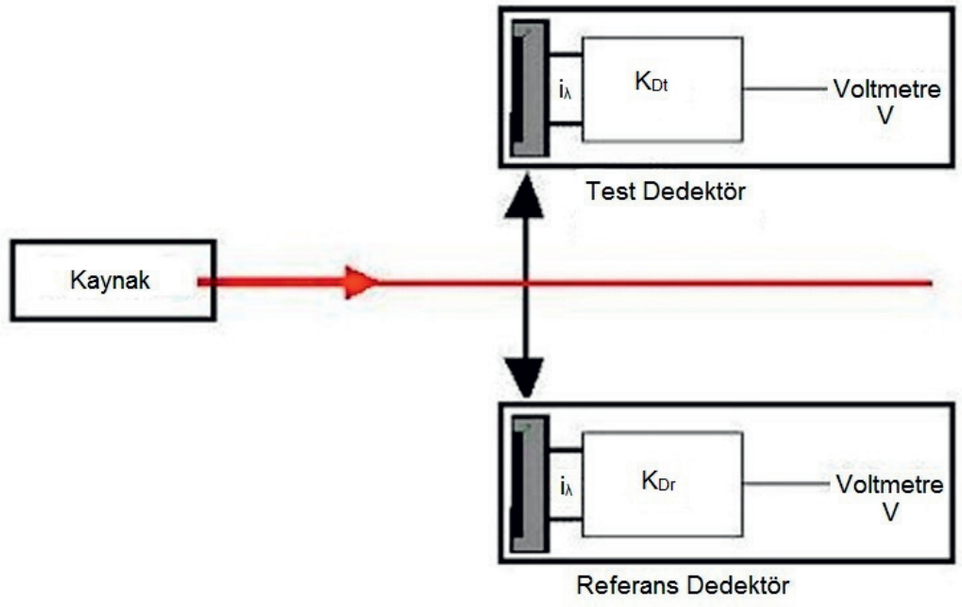
R_m : Isıl dedektörün lazer dalgaboylarındaki ışınım akılarına karşı tepkisi [A/W]

Isıl dedektörlerin geçirgenlikleri genellikle sıfırdır. Dolayısıyla Şekil 423'de gösterildiği gibi yansıma değerleri ölçülerek lazer dalgaboylarında elde edilen duyarlılık değerleri daha geniş dalgaboyu aralığı için çıkarılabilir.



Şekil 423. Isıl bir dedektörün (Pyroelektrik) tayfsal yansıma ve duyarlılık değerleri

Foton dedektörler kuantum dedektörlerdir ve teorik olarak tek fotonu algılama özelliğine sahiptirler [284]. Bu özellik foton dedektörlerin enerji band yapısından kaynaklanmaktadır. Foton dedektörlerin enerji bandında ısıl dedektörlerin aksine yasak enerji aralığı bulunmaktadır. Diğer bir deyişle değerlilik bandı ile iletim bandı arasında bir boşluk bulunur. Dolayısıyla fotodiyotlar üzerine düşen bir fotonun enerjisi yasak enerji aralığından büyük ise dedektörün yapıldığı malzemenin atomlarının değerlilik elektronlarını üst enerji seviyelerine çıkararak, yani değerlilik bandından iletim bandına geçirerek dedektörde elektron deşik çiftlerinin oluşmasını sağlar ve dedektörde akım oluşur. Enerjileri yasak enerji aralığından küçük olan fotonlar bu nedenle dedektörde akım oluşturamazlar. Bu yüzden bu dedektörlerin duyarlılıkları belirli dalgaboyu aralıkları ile sınırlıdır. Si, Ge, GaAs, InAs, PbSe,InSb, GaAs ve InGaAs. gibi çeşitli sayıda foton dedektörler bulunmaktadır. Bu dedektörlerin alt dalgaboyu limitleri, dedektör üzerine düşen foton sayıları ve fotonların dedektörlerin aktif alanına ulaşamaması ile ilgilidir. Üst dalgaboyu limitleri ise fotonların bu dalgaboyundaki enerjilerinin bu dedektörlerde elektron deşik çiftlerini yaratabilecek enerjiye sahip olmaması ile ilgilidir. Duyarlılık hızı, kuantum verimi, aktif alanın şekli ve büyüklüğü, duyarlılık doğrusallığı, uzaysal homojenlik, karanlık gürültü veya diğer gürültü çeşitleri foton dedektörlerin performansını etkileyen önemli özelliklerdir. Çalışma standardı foton dedektörlerin tayfsal duyarlılık değerleri, tayfsal duyarlılık değerleri bilinen tuzak dedektör kullanılarak Şekil 424'deki gibi ölçülebilir [283]. Duyarlılık değeri ölçülecek olan çalışma ve transfer standardı dedektörlerin optik güce karşı tepkileri sırası ile ölçülür ve Eşitlik (269) kullanılarak çalışma standardı dedektörün duyarlılık değerleri hesaplanır. Şekil 424'de bu yöntem ile ölçülen çeşitli dedektörlerin duyarlılık grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 424. Karşılaştırmalı yöntem ile duyarlılık ölçüm sistemi

$$R_t = \frac{\left(\frac{V_t}{K_{Dt}}\right)}{\left(\frac{V_r}{K_{Dr}}\right)} \times R_r \qquad (269)$$

R_t : Test edilen dedektörün duyarlılığı [A/W]

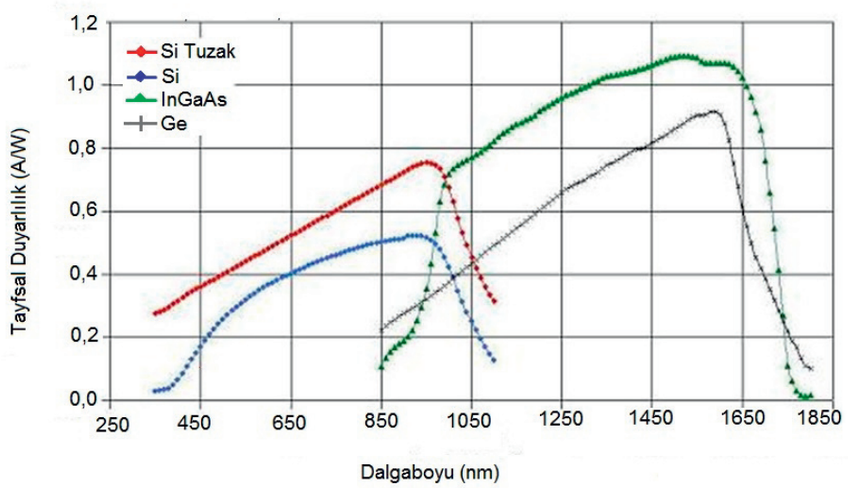
V_t : Test edilen dedektörün çıkışında okunan gerilim değeri [V]

V_r : Referans dedektörün çıkışında okunan gerilim değeri [V]

K_{Dt} : Test edilen dedektöre ait akım-gerilim dönüştürücüsünün kazancı [V/A]

K_{Dr} : Referans dedektöre ait akım-gerilim dönüştürücüsünün kazancı [V/A]

R_r : Referans dedektörün duyarlılığı [A/W]



Şekil 425. Karşılaştırmalı yöntem ile elde edilen çeşitli dedektörlerin duyarlılık değerleri

7.6.6 IŞINIM DÜZEYİ

7.6.6.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Tayfsal/Toplam ışınım düzeyi, belirtilen bir yüzey üzerine düşen elektromanyetik ışıma gücünü belirtir (Şekil 426). Toplam ışınım düzeyi, bu yüzey üzerine düşen toplam Watt cinsinden optik güç elektromanyetik ışımanın miktarının, verilen yüzeyin yüzey alanına bölünmesiyle elde edilir (W/m^2). Tayfsal ışınım düzeyi ise ışınım düzeyi değerinin (W/m^2) birim tayfsal aralığa bölünmesiyle hesaplanır ve dolayısıyla birimi de $W/(m^2\ nm)$'dir.

7.6.6.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

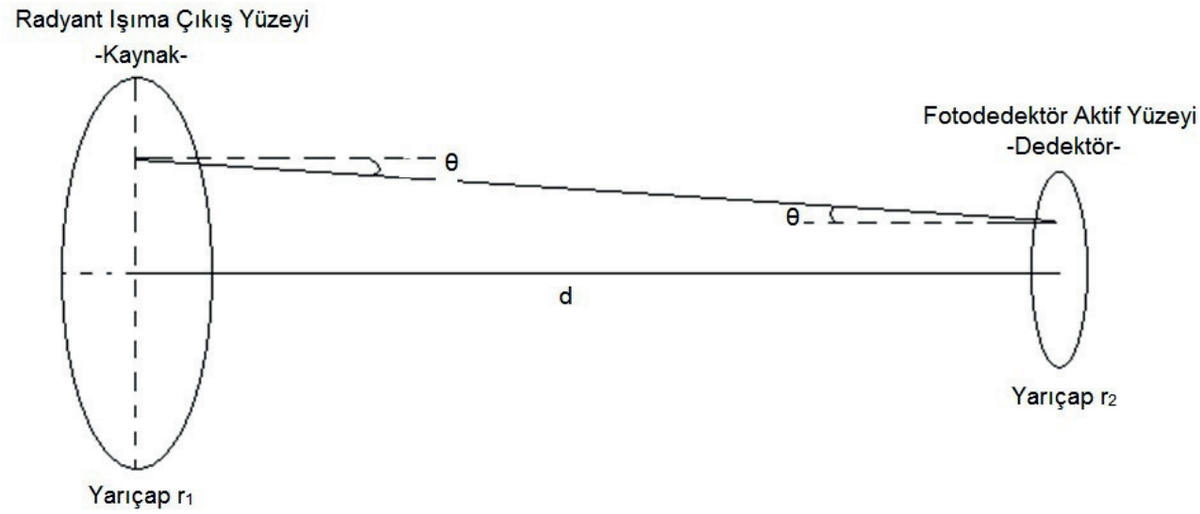
Radyometrik ölçeğin oluşturulmasında başlıca iki yöntem izlenmekte olup bu yöntemler kısaca Kaynak Tabanlı veya Dedektör Tabanlı olarak sınıflandırılır [284]. Kaynak Tabanlı Radyometrik Ölçeğin en tepesinde Plankian elektromanyetik dağılım sağlayan ve çeşitli saf metallerin erime noktalarına göre sabit sıcaklık noktalarında çalıştırılan Siyah Cisimler yer alır. Kaynak tabanlı Ölçek'te birincil seviye olarak belirtilen bu siyah cisimlere göre tayfların karşılaştırılmasıyla ve fotovoltaik (görünür bölge için Si) tipteki fotodiyot, monokromatör ile tayf özelliği siyah cisimler ile benzerlik gösteren akkor tipteki lambalara da aktarılan Işıma (Radyans) ve Işınım Düzeyi (İrradyans) ölçekleri oluşturulur.

TÜBİTAK UME'de Kaynak Tabanlı Radyometrik ölçeğin yerine Dedektör Tabanlı Radyometrik ölçek kullanılmakta olup bu ölçekte birincil seviye 4,2 K sıvı helyum sıcaklığına kadar soğutulmuş soğurucu kavite içeren elektriksel yerine koyma metoduna göre çalışan ve kalorimetrik bir sistem olan Krayojenik Radyometre kullanılmaktadır [282]. Dedektör Tabanlı ve Birincil seviye standardı Krayojenik Radyometre olan bu ölçeğin belirsizlik değerleri Kaynak Tabanlı ölçeğe göre çok daha düşüktür [261].

Muntazam dağılımlı elektromanyetik ışıma kaynaklarının emisyonlarını veya Lambertian yüzeye sahip yüzeyden yansımaları karakterize etmek için kullanılan Tayfsal/Toplam Işıma ölçeğinin oluşturulması için ilgili kaynağın ışınım yapan yüzeyi ya da yansımanın olduğu yüzeyden çıkan toplam optik güç (ϕ) Watt (W) birimi cinsinden elde edilmesine ihtiyaç vardır. Dolayısıyla ışıma/ışınım düzeyi ölçeğinin oluşturulması için birincil önceliğin tayfsal optik güç (W) ölçeğinin gerçekleştirilmesi olduğu ortaya çıkmaktadır. Tayfsal optik güç (W) ölçeğinin en tepesinde yer alan ve dolayısıyla izlenebilirlik zincirinin en tepesinde yer alan sistem sıvı Helyum soğutmalı (4,2 K) elektriksel yerine-koyma yöntemine dayalı olarak çalışan, kalorimetrik şekilde kesikli tayfsal ışınım yapan lazerlerin çıkış gücünü ölçen Krayojenik Radyometre'dir [282]. Bilindiği gibi düşük sıcaklıklarda katıların öz ısıları Einstein yaklaşımına göre üstel şekilde hızla azalır bu durumda 4,2 K sıcaklığındaki soğurucu kavite içerisine lazer ışınım düşürüldüğünde lazer ışınımı düşmeden önceki kavite sıcaklığı ile aradaki sıcaklık farkı DT (K), aktarılan Q (J) enerji için hızla artacaktır. Bu durum doğrudan kavitenin ısıya karşı duyarlılığının (J/K) artırılmasına karşı gelir. Bu sistemlerde yüksek soğuruculuğa sahip bir kavite mevcut olup ölçülecek optik güç bu kavite içerisine düşürülür. Kavite içinde optik gücün oluşturduğu ısı, yarı iletken çok hassas ısılçiftler ile algılanır. Ardından soğuyan kaviteye $P = I \times V$ eşitliği uyarınca elektriksel güç uygulanır. Bu elektriksel güç uygulaması bir önceki çevrimde optik gücün oluşturduğu sıcaklık farkı elde edinceye kadar devam eder. Bu sıcaklık fark değerinin elde edildiği elektriksel akım ve gerilim değerleri çarpılarak optik gücün eş değeri elektriksel güç elde edilmiş olur. Bu doğrudan ilgili lazer ışımasının tek dalga boyu değeri için optik güç (W) değerine karşı gelir. Kesikli lazer dalga boylarında optik güç (W) değerinin belirlenmesinin ardından o gücün transfer standardına aktarılma aşaması söz konusu olup bu aktarma işlemi de genellikle fotovoltaik türdeki Si, InGaAs veya Ge tipi tek veya yansıtma tipi polarizasyon bağımlılığı ve geri yansıtması oldukça indirgenmiş tuzak yapılı fotodedektörler ile gerçekleştirilir [283]. Bu dedektörler üzerlerine düşen

optik güç akısını, geniş bir güç aralığında lineer şekilde yedi SI biriminden biri olan amper türünde (A) fotoakıma dönüştürür. Bu şekilde (A/W) olarak dalga boyunun bir fonksiyonu şeklinde mutlak optik güç (W) ölçeği elektriksel akıma (A) bağlanmış olur ve buradaki tipik belirsizlik değeri 10^{-4} mertebesindedir. Bu şekilde dalga boyunun bir fonksiyonu şeklinde elde edilmiş bulunan (A/W) mutlak tayfsal duyarlılık ölçeği daha geniş dalga boyu ve optik güç aralığında tepkiselliği bulunan elektrik kalibreli payroelektrik dedektörlere aktarılarak güç ve duyarlılık ölçekleri genişletilir. Bu yöntemle elde edilen optik güç ölçeğindeki tipik belirsizlik > % 1 düzeyindedir [284]. Belirsizliğin artması payroelektrik dedektörlerin yüzey homojenliğinin fotovoltaik dedektörlere nazaran yüksek olmasından kaynaklanmakta olup payroelektrik dedektör yüzeyine düşen radyant optik gücün bu yüzeyde kapladığı alan arttıkça bu belirsizlik de artar. Sonuçta, elektromanyetik ışıma kaynağından yayılan radyant optik güç ϕ (W), izlenebilirlik zincirine bağlı transfer veya çalışma standardı olarak belirtilen "Fotodedektör" ile elde edilir.

Şekil 426'da detayları verilen yöntem, toplayıcı küre içerisine yerleştirilmiş bir ışıma kaynağının tayfsal ışıma değerinin nasıl elde edildiğini tarif etmektedir. Bu parametreler kaynağın ve bu kaynak üzerinden ölçümü gerçekleştirmede kullanılan dedektörün yüzey alanları ile aralarındaki d mesafesinin korelasyonu ile sağlanır.



Şekil 426. Işıma yapan bir elektromanyetik kaynağın ışınım düzeyi/ışıma parametrelerinin elde edilmesi.

Işınım düzeyi ölçeğinin oluşturulmasında kullanılan ve Şekil 426'da "fotodedektör" olarak belirttiğimiz üzerine düşen foton akısına bağlı elektron akısı üreten aktif yapı, filtre radyometresidir. Filtre radyometresinin (A/W) türünden tayfsal duyarlılık değerleri, filtre radyometresi içerisinde yer alan fotodedektör önüne yerleştirilen filtrelerin geçirgenlik parametresiyle S(λ) ifade edilir. S(λ), filtre radyometresi içinde yer alan filtre ve tuzak dedektörün (ilgili tayfsal aralığa bağlı olarak Si, InGaAs, Ge vb.) ara yüzeyleri arasında oluşan çoklu yansıma kaynaklı enerji kayıplarını temsil eden çarpan şeklinde bir düzeltme faktörü de içerir. Filtre radyometresinin S(λ) tayfsal duyarlılık değerleri, mutlak tayfsal duyarlılık değerleri R(λ) evvelce elde edilmiş bulunan tuzak dedektörlere karşı gerçekleştirilir. Bu şekilde ışınım düzeyi ölçeği transfer sistemi olarak kullanılan filtre radyometresinin üreteceği fotoakım Eşitlik (270)'deki gibi olacaktır [286].

$$I_\lambda = A_d\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)E(\lambda)d\lambda \qquad (270)$$

I_λ : Filtre radyometresinin ürettiği fotoakım [A]

A_d : Filtre radyometresinin sahip olduğu foto-aralığın aktif alanı [m^2]

d_0 : 0,5 m standart mesafe [m]

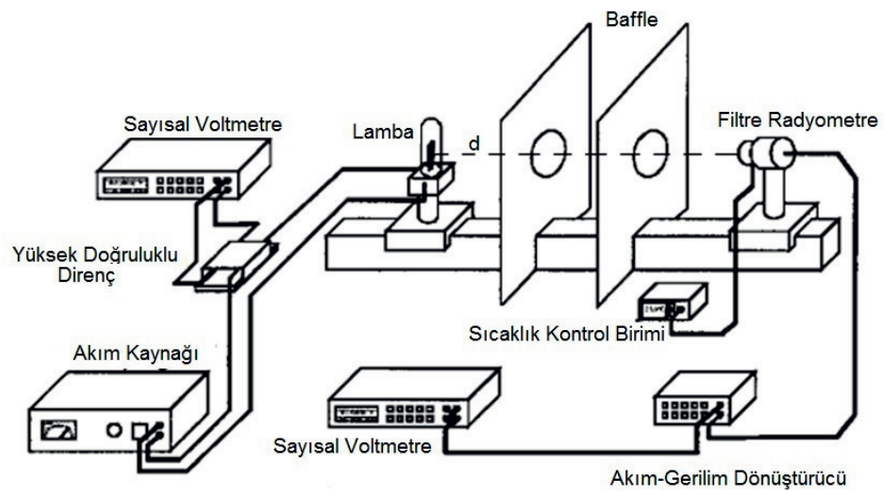
d : Lamba ile filtre radyometresi arasındaki mesafe [m]

$S(\lambda)$: Filtre radyometresinin tayfsal duyarlılığı [A/W]

$E(\lambda)$: Elektromanyetik ışıma kaynağının tayfsal ışınım düzeyi seviyesi [W/m^2]

$d\lambda$: Dalgaboyu [nm]

Işınım düzeyi ölçümleri için Şekil 427'de gösterildiği gibi d = 0,5 m'lik mesafe, standart mesafe olarak tanımlanır ve ışıma kaynağı radyant ışıma kaynağı olduğundan noktasal özellikteki kaynaktan çıkan foton akısı $4\pi r^2$'lik bir küresel yüzeye dağılır. Bu nedenle, irradyans ölçümlerinden d_0 = 0,5 m'den farklı d mesafelerinde fotoakım değeri mesafenin karesi ile yani çok kuvvetli şekilde değişim göstereceğinden $(d_0/d)^2$ şeklinde bir düzeltme faktörü eklenir.



Şekil 427. Filtre radyometre tabanlı tayfsal/toplam ışınım düzeyi ölçüm düzeneği [287]

Eşitlik (271)'e göre her I_λ fotoakım değerinden filtre radyometresinin içerdiği filtrenin $\Delta\lambda$ dalga boyu aralığı için E_λ tayfsal ışınım düzeyi seviyesi $W/(m^2nm)$ elde edilir.

$$E_\lambda = \frac{I_\lambda}{A_d \times \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times S_\lambda \times \Delta\lambda} \qquad (271)$$

E_λ : Tayfsal ışınım düzeyi seviyesi [$W/(m^2nm)$]

I_λ : Fotoakım değeri [nA]

S_λ : filtre radyometresinin tayfsal duyarlılığı [A/W]

$\Delta\lambda$: Tayfsal aralık [nm]

A_d : Filtre radyometresinin sahip olduğu foto-aralığın aktif alanı [m^2]

d : Lamba ile filtre radyometresi arasındaki mesafe [m]

d_0 : 0,5 m standart mesafe [m]

Eşitlik (271)'den, ilgili radyant elektromanyetik ışınım kaynağı için λ_1'den λ_2'ye kadar olan toplam tayfsal aralıkta, E_λ değerleri $\Delta\lambda$ dalga boyu entegral aralığı ile entegre edildiğinde ilgili radyant ışınım kaynağı için toplam tayfsal irradyans değeri E (W/m^2) cinsinden elde edilir. İlgili transfer standardı filtre radyometresinin tayfsal ışınım düzeyi duyarlılığı da $A/(W/(m^2\ nm))$ cinsinden Eşitlik (272)'de verildiği gibi elde edilir,

$$\frac{I_\lambda}{E_\lambda} = A_d \times \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times S_\lambda \times \Delta\lambda \qquad (272)$$

I_λ : Fotoakım değeri [A]

E_λ : Tayfsal ışınım düzeyi seviyesi [$W/(m^2\ nm)$]

S_λ : Filtre radyometresinin tayfsal duyarlılığı [A/W]

$\Delta\lambda$: Dalga boyu integral aralığı [nm]

A_d : Filtre radyometresinin sahip olduğu foto-aralığın aktif alanı [m^2]

d : Lamba ile filtre radyometresi arasındaki mesafe [m]

d_0 : 0,5 m standart mesafe [m]

Tayfsal/toplam ışınım düzeyi değeri, mesafenin 2. dereceden fonksiyonudur ve belirli mesafe değeri için verilir.

7.6.7 IŞIMA

7.6.7.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Tayfsal/Toplam ışıma, belirtilen bir doğrultudaki katı açı içerisine, ışıma yapan bir kaynağın yüzeyinden çıkan veya bu kaynağın yüzeyinden geçen ışıma miktarını ifade eder (Şekil 428). Tayfsal ya da toplam ışıma, muntazam dağılımlı elektromanyetik ışıma kaynaklarının emisyonlarını veya Lambertian yüzeye sahip yüzeyden yansımaları karakterize etmek için kullanılan radyometrik bir büyüklüktür. SI birim sisteminde toplam ışıma birimi W/(sr·m^2) iken tayfsal ışıma birimi W/(sr·m^2·nm)'dir.

7.6.7.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Tayfsal/Toplam ışınım düzeyi ölçeğinin oluşturulmasında transfer standardı olarak kullanılan ve (A/W) cinsinden tayfsal duyarlılığı kalibre edilen filtre radyometresi, tayfsal/toplam ışıma ölçeğinin oluşturulmasında da transfer standardı (veya çalışma standardı) olarak kullanılmaktadır. Tayfsal radyans (L(λ,T)), Plankian yayılım yapan siyah cisimde sıcaklığın üstel fonksiyonudur.

$$L(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{\exp\left(\frac{hc/\lambda}{kT}\right)-1} \qquad (273)$$

L(λ,T) : Tayfsal radyans

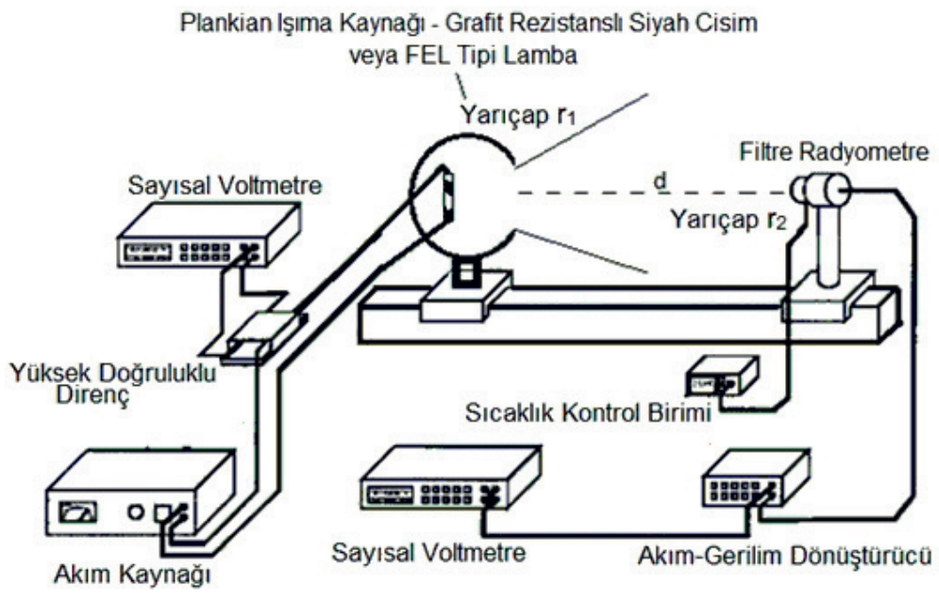
h : Plank sabiti, [6,6260693×10^{-34} J s]

c : Işık hızı [2,99792458×10^8 m/s]

λ : Dalgaboyu [nm]

k : Boltzman sabiti [1,380658×10^{-23} J/K]

T : Sıcaklık [K]



Şekil 428. Filtre radyometre tabanlı tayfsal/toplam ışıma ölçeğinin oluşturulması.

Şekil 428'de verilen tayfsal/toplam ışıma ölçeğin oluşturulması aşamasında, radyant ışınım kaynağının sıcaklığa bağımlı değişen tayfının kontrolü için ilave olarak kalibreli bir monokromatöre ihtiyaç duyulur.

Herhangi bir elektromanyetik ışıma kaynağının r (m) mesafesinde oluşturacağı ışınım düzeyi seviyesi, ışıma cinsinden Eşitlik (274)'deki gibi verilir.

$$E_\lambda = \int L_\lambda d\Omega \qquad (274)$$

E_λ : Kaynağın belirli bir mesafedeki ışınım düzeyi seviyesi [W/m^2]

L_λ : Kaynağın tayfsal ışıma değeri[W/(m^2 sr nm)]

$d\Omega$: Birim katı açı [sr]

Kaynağın (W) cinsinden ürettiği tayfsal güç ϕ_λ (W/nm), tayfsal ışıma türünden (W/nm), Eşitlik (275)'deki gibi ifade edilir.

$$\phi_\lambda = \int\int \varepsilon L_\lambda dA d\Omega \qquad (275)$$

ϕ_λ : Kaynağın ürettiği tayfsal güç [W/nm]

ε : Plankian kaynağın yayıcılık faktörü (emissivite). Maksimum değeri 1'dir

L_λ : Kaynağın tayfsal ışıma değeri[W/(m^2 sr nm)]

dA : Kaynağın birim yüzey alanı [m^2]

$d\Omega$: Birim katı açı [sr]

Eşitlik (275)'de verilen birinci entegral kaynağın yüzey alanı A üzerinden alınırken ikinci entegral ise filtre radyometresinin kaynağı gören katı açı üzerinden hesaplanır. Entegral muntazam dağılımlı bir radyant kaynak için ışınım düzeyi ölçeğinden ışıma ölçeğine geçiş transfer (veya çalışma) standardı olarak kullanılan filtre radyometresinin o kaynağa olan uzaklığı ve filtre radyometresi aktif yüzey alanı ile oluşan katı açı hesaplanarak sağlanır. Şekil 428'de verilen kaynak (siyah cismin muntazam dağılımlı radyant ışıma yapan yüzeyi) ile filtre radyometresinin yüzeyi arasındaki dik uzaklık d olmak üzere kaynak yüzeyi ile filtre radyometresi (dedektör yüzeyi) üzerindeki her bir noktanın birbirlerine olan uzaklığı $R^2 = d^2 + r_1^2 + r_2^2$ şeklinde ifade edilir ($r_1 > r_2$). Bu durumda kaynağın tayfsal optik güç dağılımı (ϕ_λ) Eşitlik (276) ile ifade edilir.

$$\phi_\lambda = \frac{L_\lambda \pi^2}{2}\left[R^2 - \left(R^4 - 4r_1^2 r_2^2\right)^{1/2}\right] \cong \frac{L_\lambda (\pi r_1^2)(\pi r_2^2)}{R^2}(1+\delta) \qquad (276)$$

ϕ_λ : Kaynağın ürettiği tayfsal güç [W/nm]

L_λ : Kaynağın tayfsal ışıma değeri[W/(m^2 sr nm)]

d : Kaynak (siyah cismin muntazam dağılımlı radyant ışıma yapan yüzeyi) ile filtre radyometresinin yüzeyi arasındaki dik uzaklık [m]

R : Kaynak yüzeyi ile filtre radyometresi (dedektör) yüzeyi üzerindeki her bir noktanın birbirlerine olan uzaklığı [m]

r_1 : Radyant kaynağın ışıma verdiği dairesel yüzeyin yarı çapı [m]

r_2 : Filtre radyometresi aktif yüzey yarı çapı [m]

δ : Düzeltme faktörü $(r_1^2 r_2^2)/R^4$

Eşitlik (276)'da verilen tayfsal optik güç dağılımına sahip radyant kaynağın tayfsal ışınım düzeyi, Eşitlik (277)'de verildiği gibi filtre radyometresinin yüzey alanına ($A_d=\pi\ r_2^2$) bölünerek elde edilir[288].

$$E_\lambda = \frac{\phi_\lambda}{A_d} \cong \frac{L_\lambda(\pi r_1^2)}{R^2}(1+\delta) \qquad (277)$$

E_λ : Tayfsal ışınım düzeyi seviyesi [W/(m^2 nm)]

ϕ_λ : Kaynağın (siyah cisim veya Plankian tipte radyant elektromanyetik ışıma kaynağı) ortalama tayfsal ışıma değeri [W/nm]

A_d : Filtre radyometresinin yüzey alanı [m^2]

L_λ : Kaynağın tayfsal ışıma değeri[W/(m^2 sr nm)]

δ : Düzeltme faktörü $(r_1^2\, r_2^2)/R^4$

R : Kaynak yüzeyi ile filtre radyometresi (dedektör) yüzeyi üzerindeki her bir noktanın birbirlerine olan uzaklığı [m]

r_1 : Radyant kaynağın ışıma verdiği dairesel yüzeyin yarı çapı [m]

Eşitlik (277) ile Eşitlik (271) karşılaştırılarak tayfsal ışınım düzeyi duyarlılığı Eşitlik (272)'deki gibi elde edilmiş bulunan transfer standardı filtre radyometresi ile tayfsal ışıma ölçeği için elde edilecek olan fotoakım değeri de Eşitlik (278)'deki gibidir:

$$L_\lambda = \frac{I_\lambda R^2}{(\pi r_1^2)\varepsilon\, A_d\, S_\lambda (1+\delta)\, \Delta\lambda} \qquad (278)$$

L_λ : Kaynağın toplam ışıma değeri[W/(m^2 sr)]

I_λ : Fotoakım değeri [nA]

S_λ : Filtre radyometresinin tayfsal duyarlılığı [A/W]

$\Delta\lambda$: Tayfsal aralık [nm]

A_d : Filtre radyometresinin yüzey alanı

ε : Plankian kaynağın yayıcılık faktörü (emissivite). Maksimum değeri 1'dir

δ : Düzeltme faktörü $(r_1^2\, r_2^2)/R^4$

R : Kaynak yüzeyi ile filtre radyometresi (dedektör) yüzeyi üzerindeki her bir noktanın birbirlerine olan uzaklığı [m]

r_1 : Radyant kaynağın ışıma verdiği dairesel yüzeyin yarıçapı [m]

Filtre radyometresinin kullanıldığı tayfsal/toplam ışıma ölçeğinin oluşturulmasında filtre radyometre çıkışındaki fotoakımın değişimi Eşitlik (278)'deki gibidir. Plankian emisyon yapan radyant elektromanyetik ışınım kaynağı için λ_1'den λ_2'ye kadar olan toplam tayfsal aralıkta, L_λ değerleri $\Delta\lambda$ dalga boyu aralığında integrali alındığında, ilgili radyant ışınım kaynağı için toplam ışıma L_λ değeri elde edilir. Tayfsal/toplam ışıma mesafenin bir fonksiyonu değildir doğrudan radyant kaynağın birim yüzeyinden çıkan foton sayısını ifade eden elektromanyetik ışıma etkinliği veya radyant ışıma kaynağının aydınlattığı ilgili yüzeyin, belirtilen tayfı yansıtma kabiliyeti ile ilişkili bir parametredir.

7.7. AKIŞKAN ÖLÇÜMLERİ

Akışkanlar Mekaniği bilimi, akışkan (sıvı ve gaz) hareketlerinin, bilimsel kurallar ışığında incelenmesi ve sonuçlarının insanlığa en ekonomik olarak hizmet edecek şekilde uygulamaya aktarılması olarak tarif edilebilir.

Akışkanlar Mekaniğinin çok geniş bir uygulama alanı vardır, bu uygulamaların arasında, hidrolik enerjisi ve ısı enerjisi üretimi, kontrolü ve dağıtımı, doğalgaz, akaryakıt, su ve benzeri akışkanların üretimi, kontrolü ve dağıtımı gibi konular da bulunmaktadır. Bu işlemlerin sağlıklı yapılabilmesi için, akışkan miktarı, hızı, akışkan yoğunluğu, viskozitesi, akışkanın sıcaklığı ve basınç ölçümlerine ihtiyaç vardır. Akışkanlar ölçümleri bu konuları kapsamaktadır ve bu bölümde akışkan debisi ve hız ölçümleri konusunda bilgiler verilecektir.

Sayaçlar, endüstrinin ve günlük hayatın vazgeçilmez cihazlarıdır. Toplam akışkan miktarının veya debisinin ölçülmesinde kullanılan bu cihazlar, bu işlemler için en pratik, en ekonomik ve en sağlıklı çözüm yollarıdır.

Petrol, kimya, su, doğalgaz, atık su, gıda, boya, kozmetik, otomotiv, inşaat, tekstil ve akışkan kullanılan diğer bütün sanayi tesislerinde uygulama alanı bulan sayaçlar ve debimetreler, zaman, işgücü ve mali kayıpların önlemesinin yanı sıra, doğru bir maliyet hesabı ve üretim kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunurlar.

Su, akaryakıt, doğalgaz, solventler, asitler, yağlar, sıvı gıdalar ve diğer sıvı ve gazların kullanıldığı tesisler ve kalite kontrol laboratuvarlarında tam bir kontrol sağlamak için, akışkan debisinin ölçülmesi şarttır.

Bir şantiyede; araçlara verilen mazotun sayaçla ölçülmesi, hem sarfiyatın kontrolü ve usulsüzlüklerin önlenmesini, hem de alınan akaryakıt miktarının kullanılan ile karşılaştırılarak kontrol edilmesini sağlar.

Bir kimya fabrikasında, bir karışıma katılacak su veya sıvı kimyasalların sayaç ile ölçülerek verilmesi, hem zaman kaybını önleyecek, hem insan hatası sebebi ile çıkacak problemleri en aza indirecek, hem de üretimin kalitesini artıracaktır. Zira yanlış ölçüm hatalı formül, hatalı formül kalitesiz ürün demektir. Fabrikalar için başka bir gereklilik de çevre korumaya yönelik, yönetmelikler doğrultusunda yapılan baca gazı ölçümleridir. Baca gazlarının emisyon ölçümlerinde de baca gazı debisinin doğru olarak tespit edilip, emisyon oranın belirlenmesi gerekmektedir.

Sanayide ve evlerde kullanılan sayaç ve debimetrelerin de doğruluklarından emin olmamız gerekir. Debimetrelerin hangi doğruluk ve belirsizlikle çalıştığının, gerek doğrudan gerekse ikincil seviye laboratuvarlar aracılığı ile tespit edilmelidir. Endüstriyel metroloji, yaşam kalitesini korumak ve akademik araştırmalarda kullanılmak üzere, sanayide, üretimde ve testlerde kullanılan ölçüm cihazlarının uygun şartlarda çalışmasını güvence altına almak için çalışmalar yapmaktadır.

7.7.1 DEBİ

7.7.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Akışkan ölçümlerinde debi ve hız birimleri birincil ya da ikinci seviye standartlar aracılığı ile ölçülmektedir. Bu birimlerin tanımı şu şekilde yapılabilir:

Debi, birim zamanda geçen madde miktarı olarak tanımlanır. Madde miktarı kütle olarak belirtildiğinde kütlesel debi (örn. kg/s), hacim olarak belirtildiğinde ise hacimsel debi (örn. m^3/s) olarak adlandırılır.

Hız, akışkan moleküllerinin birim zamanda aldığı yoldur (örn. m/s).

Debinin tanımı gereği, birincil seviye bir debi standart sisteminde kontrollü bir zaman aralığında akışkanın kütlesi ya da hacmi ölçülmelidir. Sonraki bölümlerde görüleceği üzere sıvı akışlarında kütle ölçümü kolay olmasından dolayı kütlesel debi doğrudan ölçülür ve eğer gerekli ise hacimsel debi basınç ve sıcaklık ölçümleri sonucunda hesaplanan yoğunluk değeri kullanılarak bulunur. Gaz akışlarında hem hacim hem de kütle ölçen birincil seviye standartlar vardır ancak, genelde gaz hacminin ölçülmesi daha yaygındır.

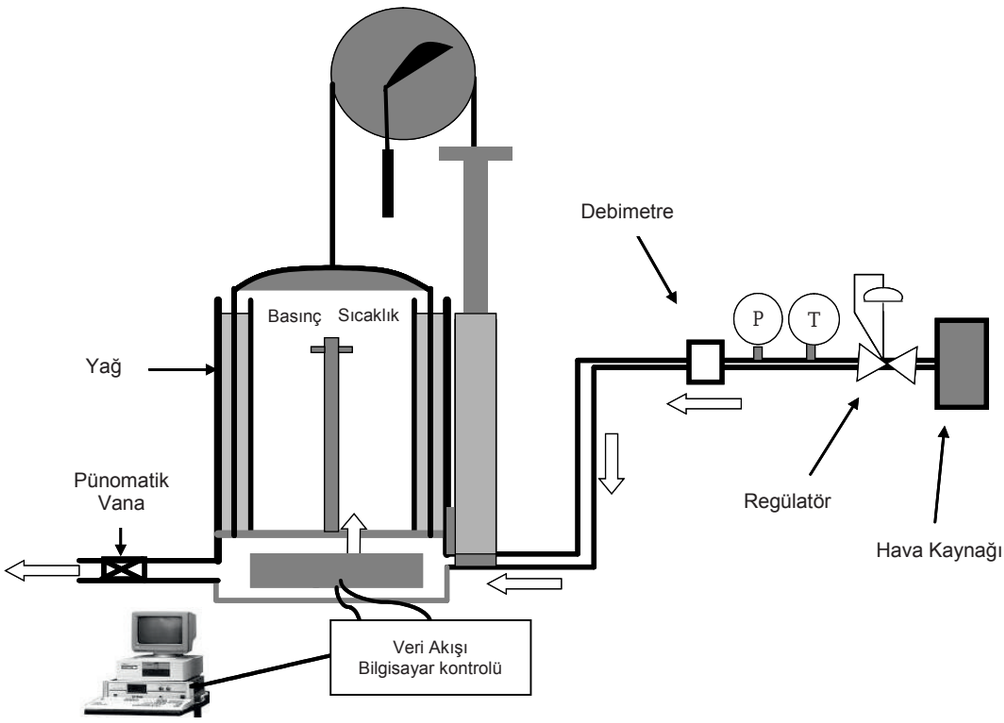
7.7.1.2 Gaz Akışı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Birinci Seviye Standartlar ve Ölçüm Sistemleri:

Gaz debisi ölçümlerinde kullanılan birincil seviye standartlar ve sistemler şunlardır:

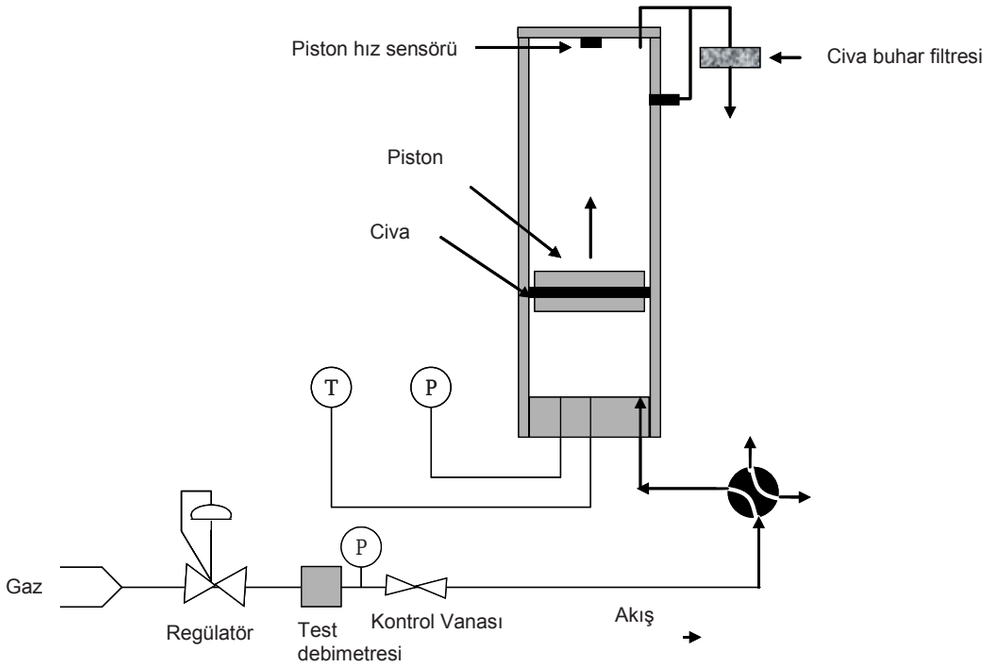
- Bell prover
- Pistonlu sistemler
- PVTt sistemleri
- Tartım (gravimetrik) esaslı sistemler

Bell prover sistemlerinde, hareketli parça çana benzediği için bu adı almıştır [290]. Silindir içerisine hava dolarken gaz basıncı ile yukarı doğru hareket eden çanın zamana karşı yer değiştirmesi bir dönel enkoder veya eşdeğeri bir sensor vasıtasıyla ölçülerek içerisine dolan hacim ve debi değeri elde edilir. Sistem belirsizliğinin en önemli bileşenleri silindir iç hacmi, yer değiştirme mesafesi ve zamandır. Bell-prover sistemine ait bir kalibrasyon düzeneği şeması Şekil 429'da gösterilmektedir.



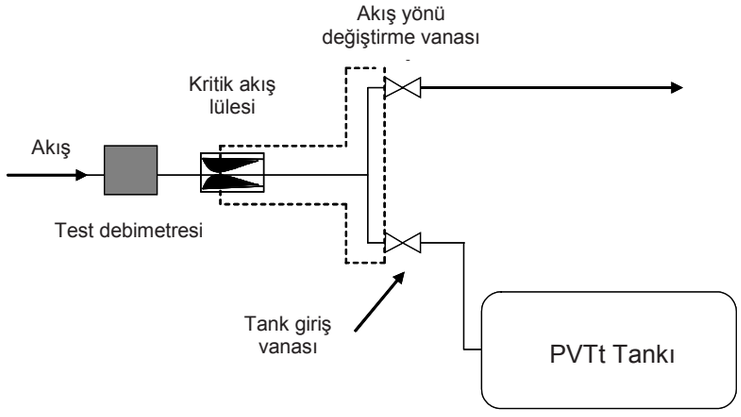
Şekil 429. Bell Prover kalibrasyon sisteminin şematik gösterimi

Pistonlu sistemlerde kesit alanı belli bir tüp içerisinde akış ile birlikte hareket eden bir pistonun zamanla yer değiştirmesi ölçülerek debi değeri elde edilir. Kuru ve sulu tip pistonlu sistemler mevcuttur ve piston sızdırmazlığı bu sistemlerdeki en önemli unsurlardan birisidir. Kuru tip sistemlerde piston etrafına yerleştirilmiş cıva, yüzeye yapışmaması dolayısıyla sızdırmazlık contası olarak kullanılmaktadır. Islak tiplerde ise cam tüp kesit alanı içerisinde hareket edebilen düzlemsel bir sıvı katmanı oluşturularak bunun piston görevi görmesi esastır. Bir cıvalı piston sisteminin şematik gösterimi Şekil 430'da verilmiştir.



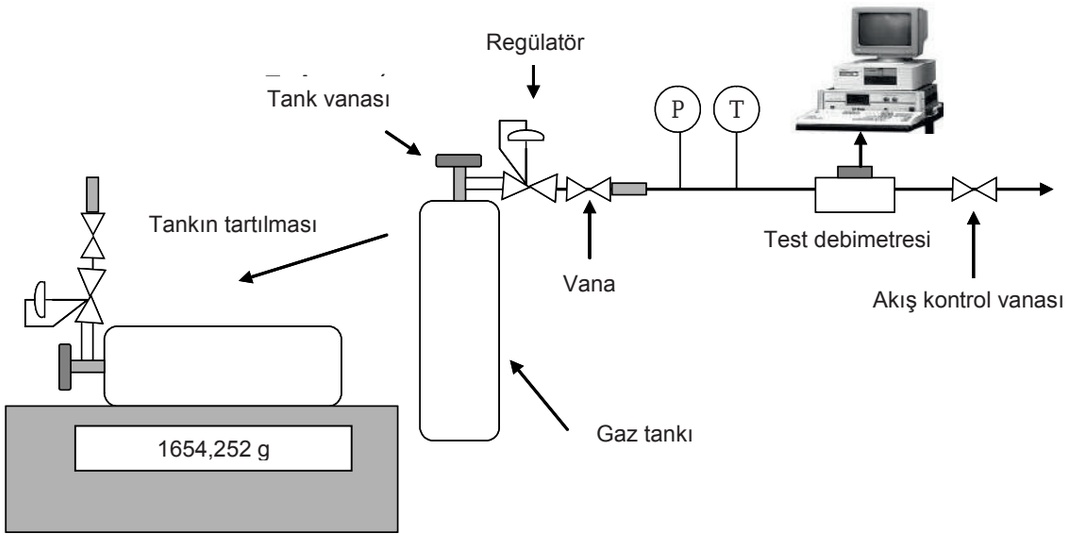
Şekil 430. Cıvalı piston sisteminin şematik gösterimi

PVTt sistemleri içerisinde belirli sıcaklık ve basınçta gaz bulunan bir tanka hava doldurulması veya boşaltılması sonucunda tank içerisinde zamanla değişen basınç ve sıcaklığı kullanarak debi hesabı yapılması prensibine dayanır. Tek bir ölçüm için uzun zaman alan bu sistemlerdeki en önemli unsur tank içerisindeki basınç ve sıcaklık ölçümlerinin doğruluğudur [300][291].



Şekil 431. PVTt sistemi şematik gösterimi

Tartım esaslı sistemler, gaz tankının içerisinden belirli bir zaman diliminde boşaltılan veya doldurulan gazın miktarının, ölçüm öncesinde ve sonrasında tartılmasıyla debinin hesaplandığı sistemlerdir. Sistemin hassasiyetini belirleyen en büyük faktör tartım işlemi için kullanılan terazinin doğruluğu ve belirsizliğidir. Tartım esaslı bir kalibrasyon sisteminin şematik gösterimi Şekil 432'de gösterilmektedir.



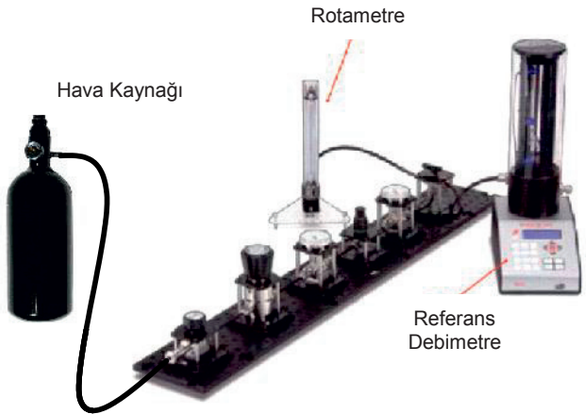
Şekil 432. Tartım esaslı gaz debi kalibrasyon sisteminin şematik gösterimi

İkinci Seviye Gaz Debi Ölçerler:

Endüstride farklı çalışma prensiplerine sahip olan çok çeşitli gaz debi ölçerler kullanılmaktadır. Bunlardan en önemlileri şunlardır:

- Fark Basıncı Debimetreleri
- Orifis
- Sonik Lüle
- Ventürimetre
- Rotametre
- Islak Tip Sayaç
- Rotary Metre
- Türbinmetre
- Termal Kütlesel Debimetre
- Ultrasonik Debimetre
- Vortex Debimetre

Yukarıda sayılan debimetreler izlenebilirliklerini birincil seviye standartlarından alırlar. Bu nedenle belirsizlikleri birincil seviye standartlarına göre daha yüksektir. Ancak sonik lüle, ıslak tip sayaçlar ve türbinmetreler gibi debimetreler düşük belirsizlikleri ve iyi tekrarlanabilirliklerinden dolayı referans debimetre (ikincil seviye standart) ve transfer standardı olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 433'de bir rotametrenin bir referans debimetre ile kalibrasyonu gösterilmektedir.

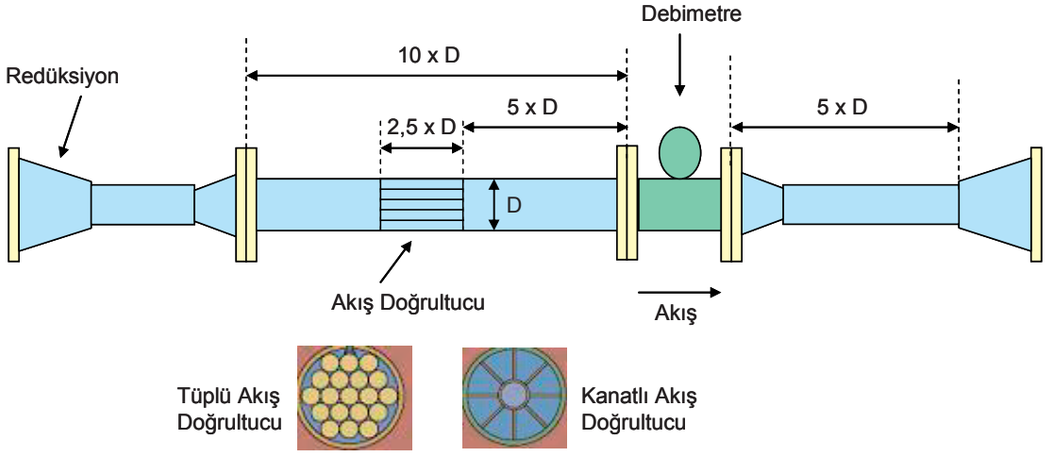


Şekil 433. Referans sayaçların kalibrasyonda kullanılması [289]



Şekil 434. Sonik lüle, rotarymetre ve ıslak tip sayaç

Şekil 434'de üç farklı debimetreye ait fotoğraflar verilmiştir. Yukarıda belirtilen debi ölçerlerden dijital/analog göstergeler, puls çıkışları ve elektriksel sinyallerle debi bilgisini elde etmek mümkündür. Kullanılan gaz cinsi, gaz basıncı ve sıcaklığı, hat düzlemindeki konumu gibi parametrelere bağlı olarak uygun debimetre seçimi gerçekleştirilebilir. Şekil 435'de bir türbinmetrenin doğru çalışması için gerekli bağlantı detayı örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 435. Türbinmetrenin ölçüm hattına bağlanması ve akış doğrultucularının konumlandırılması

Gaz Sayaçları Kalibrasyonlarında Yöntem ve Hesaplamalar

Referans gaz sayacı ve test edilecek gaz sayaçlarının üzerlerinden birim zamanda geçen hacim veya birim zamanda geçen kütle hesabı yapılarak karşılaştırma usulü ile kalibrasyonları gerçekleştirilir. Hacimsel ve kütlesel ölçüm olarak sınıflandırılan bu iki yöntemin hangisinin kullanılacağına karar vermek için çoğunlukla ölçüm yapılacak gaz ve kullanım alanı belirleyicidir.

Akan gazın kütlesel debisi ($\dot{m}$) doğrudan ölçülebileceği gibi hacimsel debinin (Q) o anda geçen gazın yoğunluğu (ρ) ile çarpımı ile de bulunabilir.

$$Q = \frac{dV}{dt} \tag{279}$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \tag{280}$$

$$\dot{m} = Q \times \rho \tag{281}$$

Gaz sayaçları hacimsel kalibrasyonu yapılırken her debimetre öncesinde basınç ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek geçen gerçek hacim değerini bulmak için hacim değeri üzerinde düzeltme yapılmalıdır. Genel gaz kanununa bağlı olarak ölçülen hacmin basınç, sıcaklık ve sıkıştırılabilirlik düzeltmeleri yapıldıktan sonra referans ve test debimetrelerinin standart şartlarda (1013,25 mbar basınç ve 20 ^{0}C sıcaklık) bir karşılaştırması mümkün olabilir. Hacim üzerinde yapılacak bu düzeltme aynı zamanda debi üzerindeki düzeltme anlamına da gelmektedir.

$$Q_s = \frac{P}{P_s} \times \frac{T_s}{T} \times \frac{Z_s}{Z} \times Q_m \tag{282}$$

Q_s : Standart debi (m^3/h)

Q_m : Ölçülen debi (m^3/h)

P : Ölçüm anındaki basınç (bar)

P_s : Standart basınç (1013,25 mbar)

T_s : Standart sıcaklık (293,15 K)

T : Ölçüm anındaki sıcaklık (K)

Z_s : Standart şartlardaki sıkıştırılabilirlik faktörü

Z : Ölçüm şartlarındaki sıkıştırılabilirlik faktörü

Kalibrasyon eğer atmosfer basıncı civarında bir gaz ile yapılıyorsa sıkıştırılabilirlik faktörü Z=1 kabul edilebilir. Yüksek basınçlı gazlarla çalışırken ideal gaz denklemi yerine o basınç aralığında doğru sonuçları vermesi beklenen gerçek gaz denklemlerinden birisinin kullanılması doğru olacaktır. Yüksek basınçta kalibrasyon yapılıyorsa sıkıştırılabilirlik faktörü geçen hacmin doğru olarak hesaplanmasında büyük önem taşır.

Puls çıkışlı sinyal veren test sayacından geçen hacim Eşitlik (283) ile hesaplanabilir;

$$V = \frac{C_m}{K_m} \tag{283}$$

C_m : Puls sayısı

K_m : Sayaç K-faktörü (puls sayısı / m^3)

dolayısıyla hacimsel debi Eşitlik (284) ile ifade edilir:

$$Q = \frac{C_m}{K_m \times S_m} \quad (284)$$

S_m: Puls sayımı için geçen süre

Sayaçtan elde edilecek debinin referanstan geçen debiyle karşılaştırılması sonucu her bir debi için hata Eşitlik (285) kullanılarak hesaplanır:

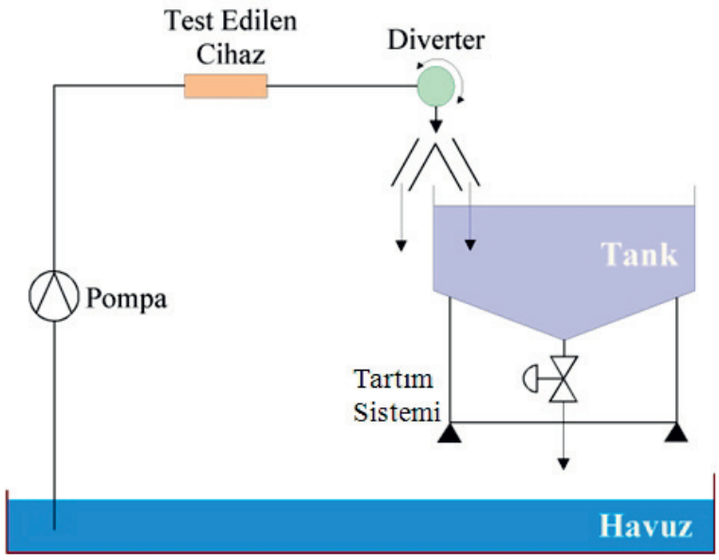
$$\%\,\text{Hata} = \frac{\text{Test Debisi} - \text{Referans Debi}}{\text{Referans Debi}} \times 100 \quad (285)$$

7.7.1.3 Sıvı Akışı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Birincil Seviye Standartlar ve Ölçüm Sistemleri:

Sıvı akışkanlar bulundukları kabın şeklini almaları ve sıkıştırılamadıkları için, kontrollü bir zaman aralığında bir kapta veya tankta toplanarak kütlelerinin belirlenmesi kullanılan en yaygın birincil seviye yöntemidir. Bu yöntem Statik Tartım (Gravimetrik) olarak adlandırılır ve sıvı akışkanın kütlesel debisi doğrudan hesaplanır.

Şekil 436'da görüldüğü gibi statik tartım metodunda kullanılan sistem bir tank, tartım sistemi (terazi/load cell), diverter, zaman ölçüm düzeneği, besleme tankı (ya da havuz), pompa ve vanalardan oluşur. Besleme için, taşmalı sabit seviye tankı kullanılabileceği gibi şekilde de gösterildiği gibi doğrudan pompalar ile de besleme yapılabilir.



Şekil 436. Kütlesel debi ölçüm sistemi.

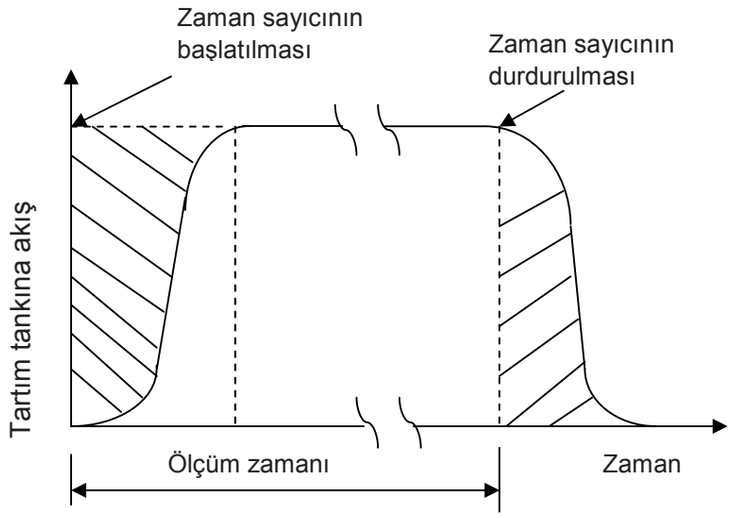
Tartım metodu, sadece ağırlık ve zaman ölçümü ile akışı ölçme prensibine sahip olduğu için mükemmel sonuç verir. Bu metot, bütün debi ölçüm sistemleri içinde en hassas olanı olarak değerlendirilebilir. Bağlantılar çok dikkatli yapıldığı takdirde, belirsizlik % 0,1'i (% 95'lik güvenirlik sınırları içinde) geçmemektedir.

Tartım cihazı olarak, gerekli hassasiyeti, kararlılığı ve tekrarlanabilirliği sağlayan mekanik veya strain-gaugeli load-cell'ler kullanılabilir. Tartım sisteminin kurulmasından sonra tüm ölçüm aralığı boyunca standart ağırlıklar ile kalibrasyonu yapılması gerekir. Sistemin iç kalibrasyonunu gerçekleştirmek için, ölü ağırlıklardan oluşan bir kalibrasyon sistemi kurulması da mümkündür.

Diverterin görevi, ölçüm yapılmadığı zamanlarda sıvıyı by-pass ederek, besleme havuzuna/tankına gönderir. Böylece akış kesilmez ve süreklilik sağlanır. Başlangıç ve bitiş arasında debi değişiminden sakınılmış olunur. Ölçüme başlanmadan önce, ilk tartım alınır, m_0. Diverter sıvıyı tanka yönlendirdiği anda, zaman sayımı başlatılır. Sayaçtan geçen sıvı istenen belirsizliği verebilecek miktara ulaşıncaya kadar diverter vasıtasıyla, terazi üzerindeki tankta toplanır. Ölçüm bittiğinde, yani diverter by-pass'a sıvıyı verdiğinde, zaman sayımı durdurulur ve terazi durağan hale geldiğinde son tartım, m_1 alınır. Sıvı by-pass'dan geçerek akmaya devam eder. İlk ve son tartımlar arsındaki fark alınıp(Δm), sayılan zaman, t'ye bölünerek kütlesel debi bulunur.

Kütlesel debinin, ölçülen veya hesaplanan sıvının yoğunluğuna bölünmesi ile de hacimsel debi bulunur. Ancak sıvının tartım anındaki yoğunluğunu gerekli hassasiyette tespit etmek gerekir. Eğer sıvımız saf ve temizse, sadece sıcaklığını ölçüp, tablolardan yoğunluk değerini elde edebiliriz. Sıcaklık ölçümü için herhangi bir sıcaklık ölçer kullanabiliriz. Sıvımızın su olması durumunda, sıcaklıktaki 0,5 °C'lik belirsizlik, yoğunlukta 10^{-4}'den daha az bir hataya neden olmaktadır [293].

Sistemde zaman sayımı akış yönlendiricinin açılıp kapanması ile başlar ve sona erer. Bu yüzden, sistemde kullanılan akış yönlendiricinin, açılması ve kapanması arasında geçen zamanın birbirine çok yakın olması gerekmektedir. Çünkü zamanın saymaya başladığı an ile vananın tam açıldığı anlar farklıdır (Şekil 437). Aynı şekilde ölçümü bitirme komutu verildiğinde, zaman sayıcı hemen duracak ancak vananın tamamen kapanması belli bir zaman alacaktır. İşte bu iki zaman farkının eşit olması durumunda hatalar minimuma inecektir.



Şekil 437. Diverter çalışma eğrisi

Tanktan suyun boşaltılması için, tanka ağırlığını vermeyecek şekilde kurulan drenaj sistemi kullanılır. Buradan su, havuza veya atık hattına gönderilir.

Ortalama kütlesel debi, gerçek kütlenin toplama zamanına bölümüyle bulunur:

$$q_m = \frac{\Delta m}{t} = \frac{m_1 - m_0}{t} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} \qquad (286)$$

m_1 : Başlangıç anındaki tank ağılığı [kg]
m_2 : Test sonundaki tank ağılığı [kg]
t : Test süresi [s]
ρ_a : Hava yoğunluğu [kg/m^3]
ρ_p : Metal kütlelerin (ölü ağırlık) yoğunluğu [kg/m^3]
ρ : Su yoğunluğu [kg/m^3]
q_m : Kütlesel debi [kg/s]

Eşitlikteki son terim, kaldırma kuvvetinin tartıma olan etkisini düzeltmek amaçlıdır.

Eşitlik (286) şu şekilde yazılabilir:

$$q_m \approx \frac{m_1 - m_0}{t} \times (1 + \varepsilon) \tag{287}$$

$$\varepsilon = \rho_a \times \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_p} \right) \tag{288}$$

Bu eşitlik de:

ρ = 1000 kg/m^3 (suyun yoğunluğu)

ρ_a = 1,21 kg/m^3 (1 bar ve 20 °C'de havanın yoğunluğu)

ρ_p =8000 kg/m^3 (kalibrasyonda kullanılan ölü ağırlıkların yoğunluğu, OIML R 33'e göre ortalama değeri)

Bu durumda;

$\varepsilon = 1{,}06 \times 10^{-3}$

$$q_m = 1{,}00106 \times \frac{m_1 - m_0}{t} \tag{289}$$

Hacimsel debi:

$$q_V = \frac{q_m}{\rho} = \frac{m_1 - m_0}{\rho \times t} \times (1 + \varepsilon) \tag{290}$$

olarak bulunur.

İkincil Seviye Sıvı Debi Ölçüm Referans Sistem ve Cihazları

Endüstride kullanılan debimetre çeşitlerinden en çok bilinenler şu şekilde sıralanabilir:

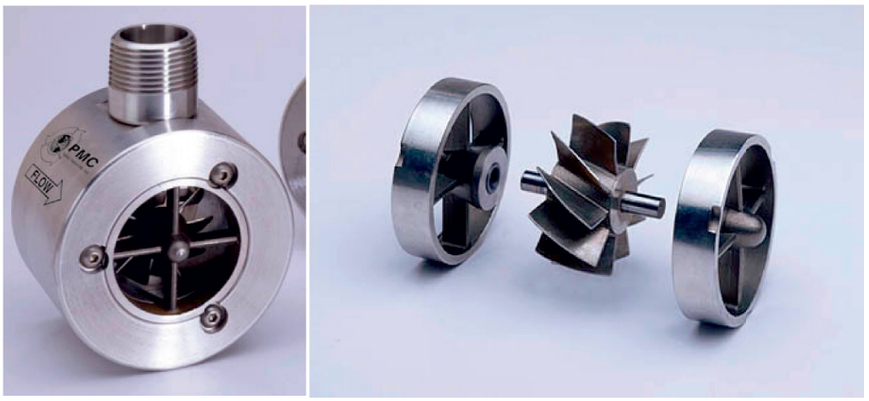
- Türbinmetre
- Elektromanyetik debimetre
- Pozitif yerdeğiştirmeli debimetreler
- Döner diskli debimetre
- Oscilating circular piston meter
- Çoklu rotorlu debimeter
- Oval dişli debimetre
- Kayan kanatçıklı debimeter

- Sarmal rotorlu debimetre
- Karşıt hareketli pistonlu debimetre
- Hassas dişli debimetreler
- Vorteks debimetreler
- Ultrasonik debimetreler
- Doppler ölçümü
- Hareket süresine göre (transit time)
- Kütlesel Coriolis debimetreler

Bu cihazlar arasında türbinmetreler, elektromanyetik debimetreler ve kütlesel Coriolis cihazları, uygun belirsizlik ve tekrarlanabilirlik özelliklerinden dolayı, yaygın olarak ikincil seviye ve transfer standardı olarak kullanılmaktadırlar. Bu nedenle bu cihazların çalışma prensipleri ve kullanım alanlarına aşağıda kısaca değinilmiştir.

Türbinmetreler

Türbinmetreler Şekil 438'de görüleceği üzere sıvı akışın geçtiği hazne içerisine yerleştirilen bir rotordan oluşur. Akan sıvının rotor üzerinde oluşturduğu momentum etkisiyle rotor akışkan hızına bağlı olarak değişir. Rotor hızı ile debi arasında doğru bir orantı vardır ve orantı katsayısı K faktörü olarak adlandırılır.



Şekil 438. Örnek bir Türbinmetrenin iç yapısı.

Türbinmetreler küçükten büyüğe farklı boyutlarda üretilirler. Basınç kaybı oranı küçük çaplar için rotorun blokaj etkisinden dolayı büyük çaplara göre daha fazladır. Normal Türbinmetreler için turndown oranı 10:1'dir ancak daha yüksek orana sahip cihazlar bulunmaktadır.

Oldukça geniş bir debi aralığı için kullanılabilen türbinmetrelerin en iyi doğruluk ve belirsizliği % 0,1 seviyelerine kadar düşmektedir. Bu cihazlar akışın momentum etkisiyle çalışmalarından dolayı akış profilinin düzgünlüğü çok önemlidir. Bu nedenle bu cihazların akış düzelticiler ile birlikte kullanılması ve akış gelişim uzunluğunu dikkate alarak monte edilmeleri gereklidir.

Üreticilerin genelde verdiği belirsizlik değerleri; yüksek doğruluk sınıfı için; % (0,12 - 0,25) arasındadır, normal sınıf için ise % (0,25 - 0,5) arasındadır. Tekrarlanabilirlik genellikle, 50 mm ve aşağısı olan debimetreler için, % 0,05 ve 75 mm'den büyükler için % 0,02 olarak verilmektedir.

Türbinmetreler, su başta olmak üzere, ham veya işlenmiş petrol, içecekler, kroyojenik sıvılar, sağlıkla ilgili sıvılar, ikincil seviye standart, referans standart, yüksek basınç, yüksek ve düşük sıcaklıktaki sıvılar için kullanılmaktadır.

Elektromanyetik Debimetreler

Elektromanyetik debimetrelerin çalışma prensibi elektriksel iletkenliği olan sıvılarda manyetik alan oluşturulduğunda meydana gelen potansiyel farkın akış hızı ile değişmesi esasına dayanır. Şekil 439'da çalışma prensibi şematiksel olarak gösterilmiştir. Oluşan potansiyel fark, manyetik alan ve akış hızı arasındaki bağıntı Faraday kanununa göre şu şekilde yazılır:

$$U = k \times B \times V \times D \qquad (291)$$

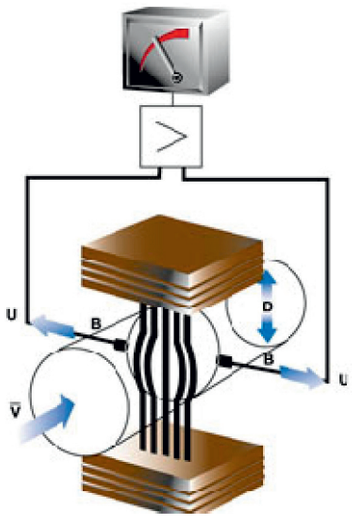
U : Potansiyel fark

k : Cihaz sabiti

B : Manyetik alan

V : Akış hızı

D : Elektrotlar arası mesafe



Şekil 439. Elektromanyetik debimetre prensibinin şematiksel gösterimi (resim: www.flotech.com.sg).

DC ve AC manyetik sayaç tipleri bulunmaktadır. Seramik yalıtımlı, metal elektrotlu, fakat malzemesi gereği elektrotların ıslanma sorunun olmadığı ve bu sebeple de elektrotsuz manyetik sayaç da denilen tipleri de mevcuttur.

Oldukça geniş gerilim toleransı, değişken sinyal, sıcaklık dalgalanması gibi durumlarda bile Elektromanyetik debimetrelerin çevirici kısmının belirsizliği % 0,2 civarındadır. Bu cihazlarla çok düşük debiler de ölçülebilir, ancak hassasiyet azalır.

Genelde bu ileticilerin sunduğu özellikler şu şekildedir:

yanıt zamanı : 0,1 s

turndown oranı : 1000:1

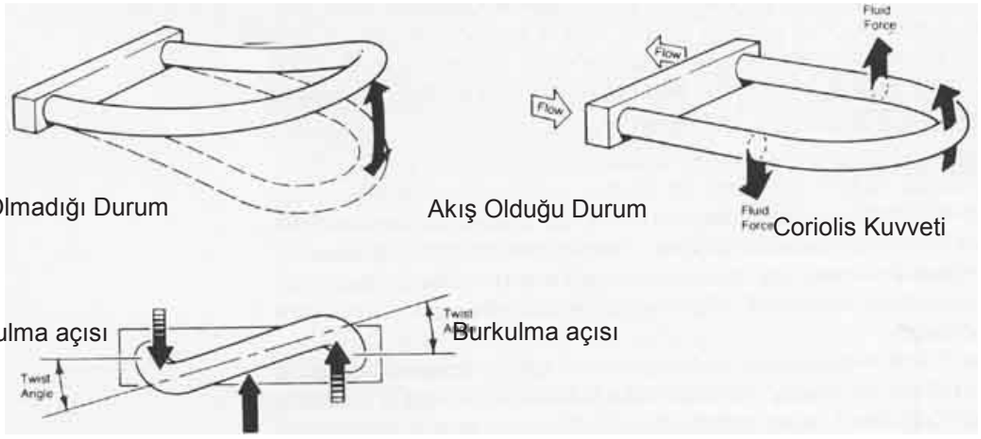
debi aralığı : (0,005-113000) m^3/h

Bu debimetrelerin etkin çalışması için, kullanılan akışkanın iletkenliğinin iyi olması gerekmektedir. Türbinmetrelerde olduğu gibi elektromanyetik debimetreler de akış profilinden çok etkilenmektedir. Bu nedenle akış düzelticileri kullanılmalı ve cihaz öncesinde akış gelişimi için yeterli gelişim uzunluğu sağlanmalıdır.

Asitler, bazlar, bira, soda, süt, meyve suyu, aramolar, sprey boya, su, ağartma kimyasalları, atık su ve radyoaktif maddeler gibi akışkanların debi ölçümlerinde kullanılabilir.

Kütlesel Coriolis Debimetreler

Coriolis tipi debimetreler bir U şeklinde ya da benzeri geometrideki kavisli borudan akan akışkanın meydana getirdiği Coriolis kuvveti neticesinde oluşan burkulma etkisini ölçme esasına dayanır. Bu burkulma etkisini ölçebilmek için kuvvetli bir elektromıknatıs yardımı ile U şeklindeki boruda titreşim oluşturulur. Akış olmadığı durumda Şekil 440'da gösterildiği gibi boru kendi doğal frekansı ile simetrik bir şekilde titreşimdedir. Borudan akış geçtiği durumda yine Şekil 440'da gösterildiği gibi oluşan Coriolis kuvveti etkisiyle boruda burkulma oluşur ve bu burkulma borunun yanlarına yerleştirilen manyetik pozisyon detektörleri ile ölçülür. Oluşan burkulma simetrik değildir ve bu asimetri sol ve sağ detektörlerinden gelen sinyal farkı yardımı ile ölçülür. Bu sinyal farkı faz farkı olarak adlandırılır ve şiddeti kütlesel debi ile doğru orantılıdır.



Şekil 440. Coriolis kütlesel debimetrelerin çalışma prensibinin şematiksel gösterimi (resim: www.data.acquisition.us).

Coriolis debimetrelerin genelde 6 mm - 200 mm çaplarında ve (0 - 3) kg/h'den (0 - 680.000) kg/h'e kadar debi aralıklarında çalışanları üretilmektedir. Cihazın ağırlığı, (8 - 635) kg aralığında, Turndown oranı, 20:1 den 100:1'e kadar olabilmektedir. Tipik sıcaklık aralığı -200 °C'den 200 °C'ye kadardır. 393 bar'a kadar çalışabilenlerine ulaşabilmek mümkündür.

Bu debimetrelerin 20:1 turndown oranı için belirsizliği, % 0,25, tekrarlanabilirliği, % 0,1 olarak verilmektedir. 100:1 turndown oranı için ise belirsizlik, % (0,5 - 1,0) olabilmektedir. Diğer taraftan bu belirsizlik değerlerinden daha düşük değerlere sahip cihazlarda bulunmaktadır.

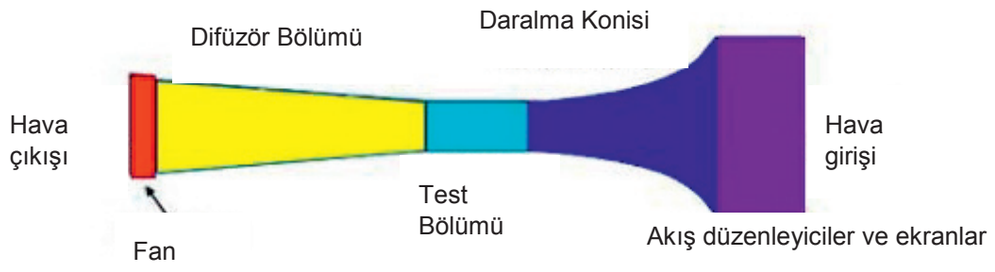
Coriolis kütlesel debimetreler, düşük belirsizlikleri, yüksek tekrarlanabilirlikleri ve aynı zamanda sıvı yoğunluğunu da ölçebilmelerinden dolayı özellikle yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Uygulama alanları etilen oksit, süt, meyve suyu, kahve, bitkisel yağ, asfalt, benzin, doğal gaz, sıvı çikolata ve boya olarak sıralanabilir.

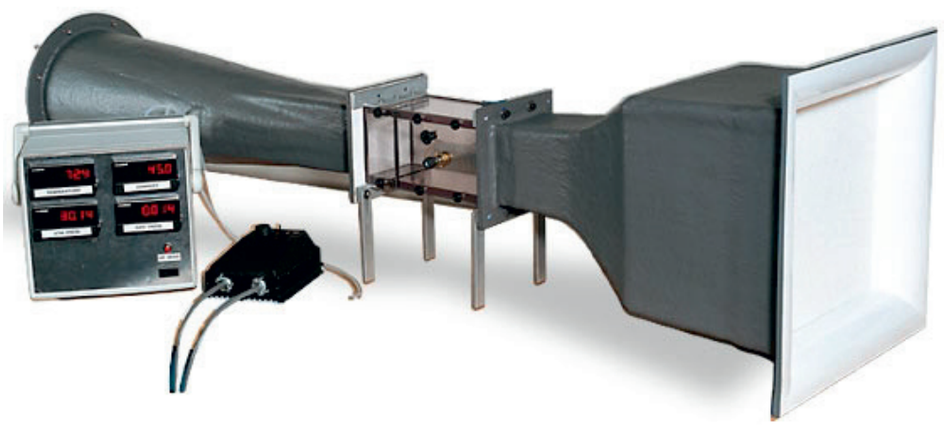
Hava Hızı Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Meteoroloji, hava ve uzay uygulamaları, otomotiv, kimya endüstrisi, ilaç sanayi gibi farklı alanlarda hava ya da daha genel olarak gaz hızlarının ölçümü farklı sensörler ve sistemler aracılığıyla yapılmaktadır. Bu bölümde hız ölçümünde birincil seviye standardı olarak kabul görmüş LDA (Lazer Dopler Anemometre) sistemi yanı sıra Pitot tüp gibi bazı ikinci seviye hız ölçerler konusunda bilgiler verilecektir.

Hava hız ölçerlerin kalibrasyonlarının laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmesi için rüzgar tünelleri kullanılır. Bu tüneller aracılığı ile kalibrasyonu yapılmak istenen hız aralığı tünel içerisinde kullanılan fan ya da fanların dönme hızlarının kontrol edilmesi yoluyla sağlanır. Temel olarak iki tip rüzgar tüneli vardır; açık devre ve kapalı devre rüzgar tünelleri.

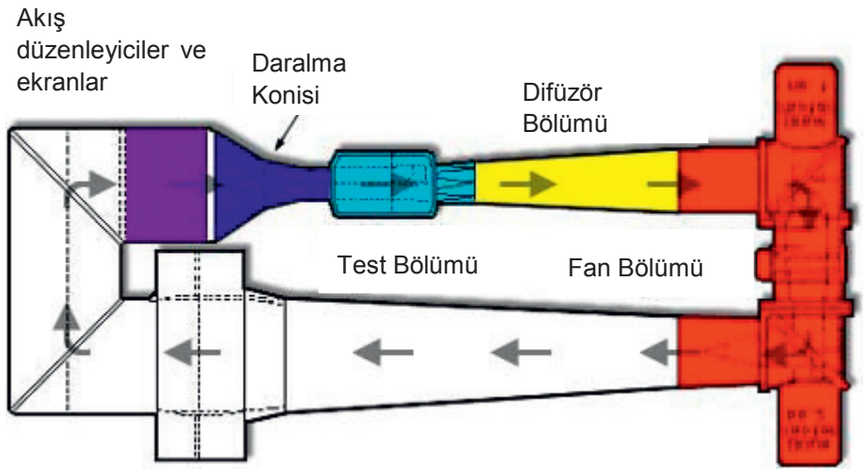
Açık devre rüzgar tünelinde akış; daralma bölümünden test bölümüne geçiş kısmına kadar düz bir hattan gelir, genişleme ve fan bölümü ile tekrar ortama atılır. Test bölümü sınırları olan bir odacık olarak veya sınırı olmayan bir boşluk olarak tasarlanabilir. Şekil 441'de kapalı bir test bölümü olan açık devre rüzgar tünelinin çizimi ve örnek bir tünel fotoğrafı gösterilmektedir.

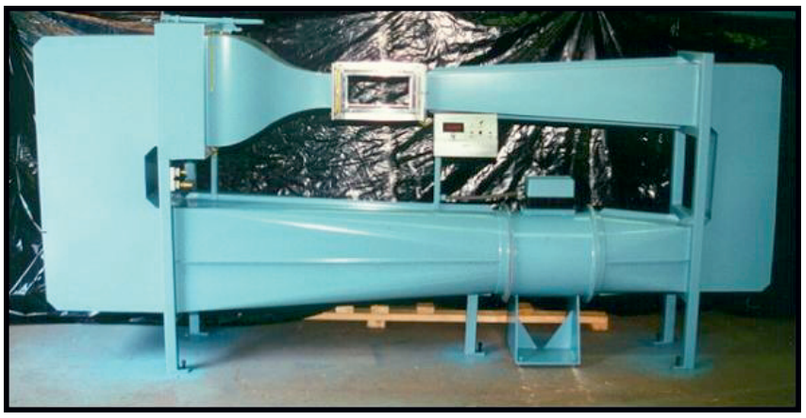




Şekil 441. Açık devre rüzgar tüneli kesit çizimi ve fotoğrafı.

Kapalı devre rüzgar tünelinden akışkanın tünel içerisinde devir daim yaptığı tasarımlar anlaşılır. Yine aynı şekilde test bölümü açık veya kapalı olabilir. Bir kapalı devre rüzgar tüneli çizimi ve örnek tünel fotoğrafı Şekil 442'de gösterilmektedir.





Şekil 442. Kapalı devre rüzgar tüneli kesiti ve fotoğrafı.

Her iki tip tünelin de bir takım avantajları ve dezavantajlarından bahsetmek mümkün. Açık devre rüzgar tünelinin avantajları şunlardır:

- Yapımı daha ekonomik,
- Tünel içinde dumanla akış görüntüleme gibi çalışmalar yapıldığında duman atmosfere atılabildiği için temizleme sorunu yok.

Açık devre rüzgar tünelinin dezavantajları ise şunlardır:

- Eğer kapalı bir binada açık devre rüzgar tüneli ile çalışılıyorsa tünel boyutlarına bağlı olarak çok büyük ekran ve akış doğrultuculara ihtiyaç duyulabilir veya çalışma sahası ortamın sıcaklığından ve soğukluğundan etkilenebilir,
- Aynı boyutlarda ve hızlarda kapalı devre tünele göre daha fazla enerji sarfiyatı gerektirir,
- Genellikle ortamda gürültü sorunu yaratır ve bu konuda önlem almak pahalı çözümler gerektirebilir.

Kapalı devre rüzgar tüneli avantajları şunlardır:

- Köşelerdeki perdeler yardımıyla daha düzgün bir akış elde edilebilir ve ortamdaki sıcaklık değişimlerinden etkilenmez,
- Aynı boyutlar ve hız için açık devre tünele göre daha az enerji sarf eder,
- Gürültü sorunu daha azdır.

Kapalı devre rüzgar tünelinin dezavantajları ise şunlardır:

- Yapımı daha fazla maliyet gerektirir,
- Akış görüntüleme deneylerinden sonra temizliği zordur,
- İçerdeki havayı aynı sıcaklıkta tutmak için ek donanımlar gerektirir.

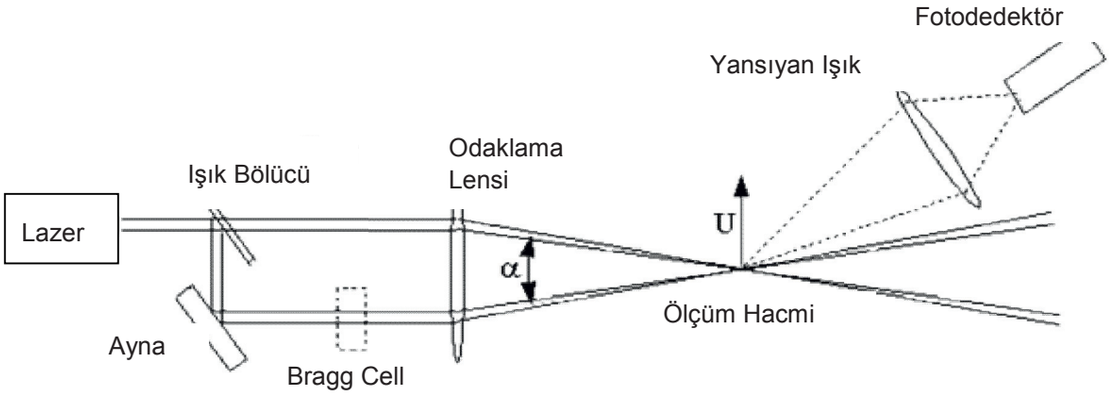
Birincil Seviye Gaz Hızı Ölçüm Standardı:

Günümüz itibariyle daha önce birincil seviye ölçüm standardı olarak kullanılan pitot tüp tekniği yerine LDA sistemleri tüm dünya metroloji kurumları tarafından kabul edilmiştir. Ancak LDA sisteminin birinci seviye standardı olabilmesi ve izlenebilirliğin temel birimlerden (metre ve saniye) sağlanabilmesi için Döner Disk Sistemi (DDS) olarak adlandırılan sistemler kullanılır. Bu bölümde LDA ve DDS hakkında temel bilgiler verilecektir.

LDA

Her ne kadar çok farklı konfigürasyonlara sahip LDA sistemleri olsa da en temel LDA konfigürasyonu Şekil 443'de gösterildiği gibidir. Bu konfigürasyon tek hız bileşenini ölçen bir ileri doğru yansımalı, çift ışık demetli sisteme aittir. Tek bileşen olması sadece U hız bileşenini ölçmesinden dolayı ve çift ışık demetli olması ise bu ölçüm için eşit yoğunluklu iki lazer ışığı kullanmasından kaynaklanmaktadır. Lazer ışınları tek bir lazer ışığının ikiye bölünmesi ile elde edilen iki ışın demetinin bir noktaya odaklanması şeklinde yollarına devam eder. Odak noktası hız ölçümünün yapılacağı alandır ve ölçüm hacmi adını alır.

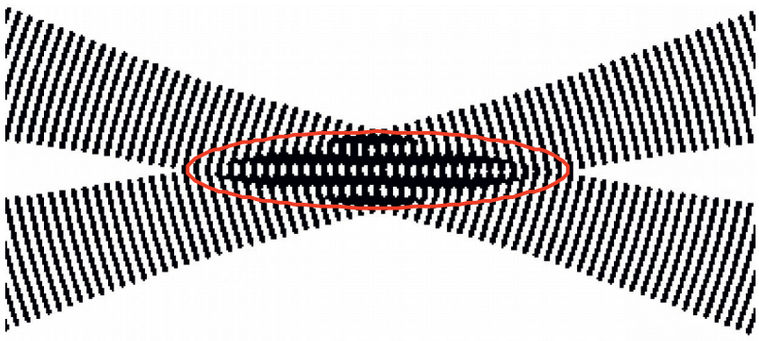
Lazer ışınlarının kesişme noktasında eşit aralıklı karanlık ve aydınlık girişim saçakları oluşur. Akış içerisindeki küçük parçacıklar bu saçaklardan geçerken hız ölçümü gerçekleştirilir. Parçacık üzerine düşen ve yansıyan ışık saçaklara bağlı olarak bir salınım gösterir. Bu salınım frekansı, saçaklar arasından geçen parçacığın saçaklara dik hız bileşeni ile doğru orantılıdır. Frekansı tespit etmek için parçacıktan yansıyan ışığın bir lens ile toplanması ve ışık yoğunluğu olarak gelen bu sinyalin gerilim sinyaline dönüştürüldüğü bir fotodedektör üzerine düşürülmesi gerekir. Buradan elde edilecek elektriksel sinyaller bir sinyal işleyicisinde toplanarak gerekli istatistiksel hesaplamalar sonrasında akış içerisindeki parçacığın hızının gösterildiği bilgisayar ekranına verilir.



Şekil 443. İleri doğru yansımalı tek hız bileşenli çift ışık demetli LDA düzeneği [294]

Şekil 444'de iki lazer demetinin kesişmesi ile oluşan karanlık ve aydınlık girişim saçakları gösterilmektedir. Lazer ışığı monokromatik, yani tek frekans ve tek dalga boyuna sahip olduğundan ve koherent yani birbirini takip eden komşu ışık dalgaları aynı fazda olduğundan

kesişim noktalarındaki tepe bölgeleri tek bir çizgi olarak sıralanır. Işık dalgaları aynı fazda olduğundan tepeler tepelerin üzerine biner ve aydınlık saçakları oluşturur. Aynı fazda olmayan bölgelerde çukurlar ile tepelerin kesiştiği noktalarda karanlık saçaklar oluşur.



Şekil 444. İki lazer demetinin oluşturduğu girişim saçakları [295].

Karanlık ve aydınlık saçaklar arasındaki mesafeyi belirlemek için lazer ışığının dalga boyu, λ ve iki lazer demeti arasındaki açı, α bilinmelidir. Şekil 444'de bu kesişim bölgesinin daha da büyültülmüş bir çizimi gösterilmektedir. Bu şekilde de gözüktüğü üzere ardışık aydınlık saçaklar ve ışık dalgaları α tepe açılı ikizkenar üçgenler oluşturmakta ve taban uzunluğu da, $\frac{\lambda}{\cos(\alpha/2)}$ olarak hesaplanabilmektedir. Trigonometri bağıntılarına göre s, saçak aralığını veren bağıntı ise;

$$s = \frac{\lambda}{2\sin(\alpha/2)} \tag{292}$$

olur.

Saçak aralığını bildikten sonra parçacık hızı ve frekans arasındaki bağıntıya geçilebilir. Eğer saçaklar birbirinden s kadar mesafede ve hızın bu saçağa dik bileşeni U ise parçacık U/s saçak sayısı kadar ilerleyecektir her bir saniyede. Dolayısıyla parçacık frekansı,

$$f = \frac{U}{s} = \frac{2\,U\sin(\alpha/2)}{\lambda} \tag{293}$$

olan bir sinyal oluşturacaktır. Bu eşitlik LDA denklemi olarak da bilinir ve LDA frekans sinyali ve geçen parçacık hızı arasındaki bağıntıyı gösterir.

Bu eşitlik kullanılarak ölçüm hacminden geçen bir parçacığın oluşturacağı frekansı hesaplamak mümkündür. En sık kullanılan lazerlerden biri olan Helyum Neon lazerinin dalga boyu 632,8 nm'dir. Lazer demetleri arasındaki açı yaklaşık 5^0 dir. Eğer bir hız ölçerden 10 m/s'lik bir hız okumak gerekiyorsa Eşitlik (293)'a göre parçacıklar ölçüm hacminden geçerken 1,4 MHz'lik bir frekans yaratmalıdırlar.

Eşitlik (292)'den görüleceği üzere LDA ölçüm hacminden geçen parçacığın hızının belirlenmesindeki en önemli parametre saçak aralığı s'dir. Bu parametrenin doğru olarak belirlenmesi için dalga boyunun ve iki ışınımın oluşturduğu açının kabul edilebilir bir belirsizlikle ölçülmesi gerekmektedir. LDA sistemlerinin hız metrolojisinde birincil seviye standart olarak kullanımında s'nin ölçülmesi yerine bir DDS sistemi arcılığıyla doğrudan ölçülen frekans *f* hıza dönüştürülür.

Döner Disk Sistemi (DDS)

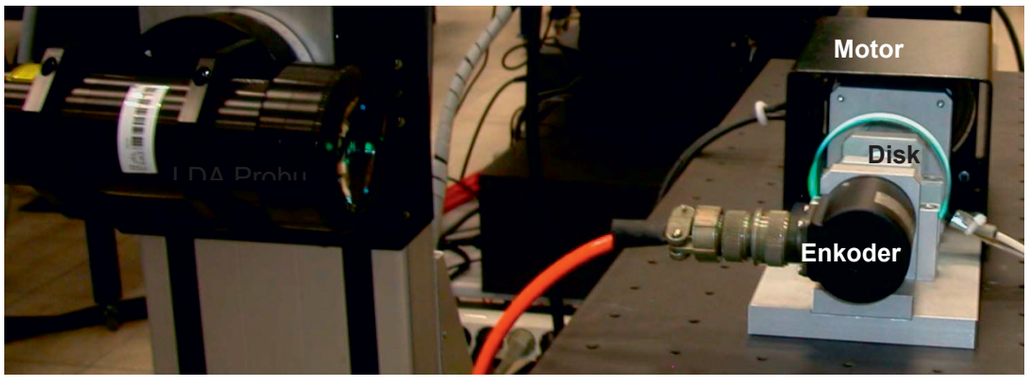
Döner disk sistemlerinde bir cam disk motor aracılığıyla ile döndürülerek disk çevresinde bilinen ve kontrol edilen çizgisel hız oluşturulur. Oluşturulan hız şu şekilde ifade edilir:

$$U = 2\pi \times D \times F \tag{294}$$

Bu eşitlikte D disk çapı, F disk dönüş frekansı ve U çevresel hızdır.

TÜBİTAK UME'de kullanılan DDS sisteminin bir fotoğrafı Şekil 445'de gösterilmektedir. Ölçümlerde LDA ölçüm hacmi disk yüzeyine konumlandırılır. Disk yüzeyindeki toz parçacıkları ve yüzey işlemesinden dolayı oluşan küçük çizikler ölçüm hacminde LDA sinyali oluşturmaya yeterlidir. Eğer disk yüzeyi çok pürüzsüz işlenmiş ve LDA sinyali üretecek toz parçacıkları yok ise, yüzeye kılcal metal tellerin yerleştirilmesi ve ya mikro parçacıkların yapıştırılması gibi çözümlere gidilmektedir.

Sistemde motor hızı enkoder aracılığıyla tespit edilir. DDS sisteminin temel belirsizlik bileşenleri diskin çapı ve enkoder hız ölçümleridir. Bunların dışında LDA ölçüm hacminin disk yüzeyine konumlandırılmasından kaynaklı belirsizlik bileşenleri de göz önünde bulundurulur.



Şekil 445. TÜBİTAK UME Döner Disk Sistemi fotoğrafı.

DDS ile yapılan LDA ölçümleri sonucunda LDA sinyal frekansı ile DDS çevresel hız arasındaki bağıntı Eşitlik (295)'de verilmiştir:

$$U = k \times f \tag{295}$$

Bu bağıntıda *k* kalibrasyon katsayısıdır.

İkincil Seviye Hava Hızı Ölçüm Referans Sistem ve Cihazları

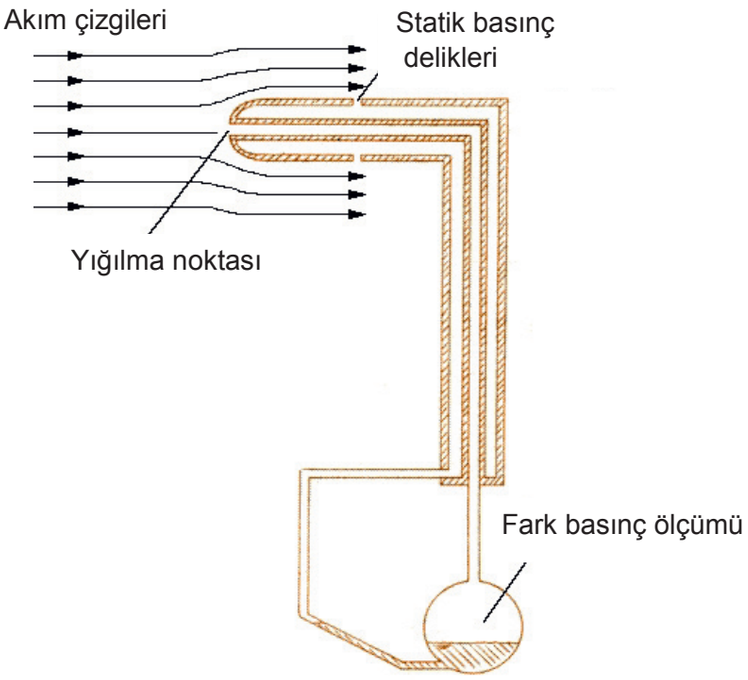
Statik-Pitot Tüp

Hız ölçümü için kullanılan cihazlardan birisi de statik-pitot tüptür. İlk defa Henry Pitot tarafından akış hızının kinetik enerjisini potansiyel enerjiye çeviren bir cihaz olarak 1732 yılında icat edilen bu ölçüm cihazı daha sonra Henry Darcy tarafından modernize edilmiştir [296]. Enerji dönüşümü pitot tüpün hemen girişinde yığılma noktası adı verilen kısımda meydana gelir. Yığılma noktasında akışın bir an için durduğu farz edilir ve buradaki basınç toplam basınç olarak alınır.

Toplam basınç tek başına hız bilgisi içermez fakat Bernoulli denkleminde yer alan,

Toplam basınç = statik basınç + dinamik basınç

eşitliğinden hız bilgisine geçilir.



Şekil 446. Statik-pitot tüp

Ses hızının yaklaşık % 30 civarı ve altındaki hızlardaki akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilebilir. Sıkıştırılamaz akış için hız ve basınç arasındaki ilişki Bernoulli denklemini kullanılarak Eşitlik (296) ile ifade edilir:

$$\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = C \qquad (296)$$

Akım çizgisi üzerinde farklı iki nokta için eşitliği tekrar düzenlersek;

$$\frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \qquad (297)$$

$z_1 = z_2$ ise ve 2 indisli nokta da yığılma noktası ise,

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} \qquad (298)$$

ve buradan hız;

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \times (p_2 - p_1)}{\rho}} \qquad (299)$$

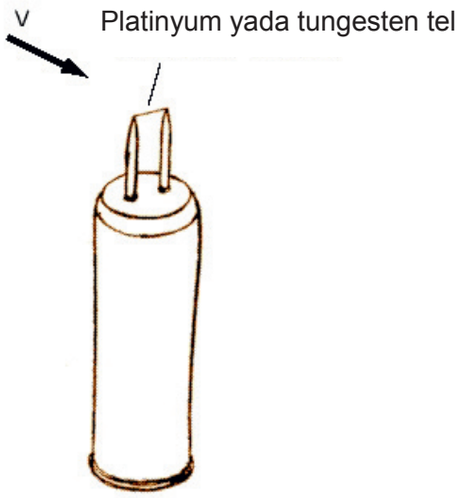
veya daha açık haliyle,

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \times (p_{toplam} - p_{statik})}{\rho}} \qquad (300)$$

olur.

Kızgın Tel Anemometresi

Termal anemometre olarak da bilinen bu tip hız ölçerler, akışın konveksiyonla uzaklaştırdığı ısının ölçülmesi prensibine dayanır. Cihazın probu ya sabit akım ile ısıtılır ya da sabit sıcaklıkta tutulmaya çalışılır ki her iki durumda da konveksiyonla kaybedilen ısı akış hızının bir fonksiyonudur. Sabit akım altında veya sabit sıcaklık sağlama koşulunda tel sıcaklığındaki değişim ölçülerek ısı kaybı elde edilir ve konvektiv teorisine göre akış hızına dönüştürülür.



Şekil 447. Kızgın tel anemometresi ölçüm probu.

Tel malzemesi olarak genellikle platinyum yada tungesten seçilir. Çap yaklaşık olarak (4 -10) μm olup uzunluğu 1 mm civarındadır. Akış içerisinde çevreyle ısı dengesi içerisinde olan bu tel bir akım geçirilerek ısıtıldığında konvektiv ısı transferi ile kaybedilecek güç kaybı teli ısıtmak için harcanan elektriksel güce eşit olacaktır. Yani,

$$I^2 R_w = h A_w (T_w - T_f) \tag{301}$$

burada I akım, R_w tel direnci, T_w ve T_f sırasıyla tel ve akışkanın sıcaklıkları, A_w akışa maruz kalan tel yüzey alanı ve h telin ısı iletim katsayısıdır. Tel direnci (R_w) sıcaklığın bir fonksiyonudur:

$$R_w = R_{ref}[1 + \alpha(T_w - T_{ref})] \tag{302}$$

α direncin termal katsayısı ve R_{ref} ise referans sıcaklıkdaki (T_{ref}) direnç değeridir.

King kanununa göre ısı iletim katsayısı h akışkan hızının bir fonksiyonudur,

$$h = a + b v_f^{\,c} \tag{303}$$

a, b ve c kalibrasyonlarla elde edilen sabitlerdir (c~ 0,5). Bu denklemeleri birleştirdiğimizde

$$h = a + b v_f^{\,c} = \frac{I^2 R_w}{A_w (T_w - T_f)} = \frac{I^2 R_{ref}[1 + \alpha(T_w - T_{ref})]}{A_w (T_w - T_f)} \tag{304}$$

ve buradan akış hızını veren eşitlik;

$$v_f = \left\{ \left[\frac{I^2 R_{ref}\left[1+\alpha\left(T_w - T_{ref}\right)\right]}{A_w\left(T_w - T_f\right)} - a \right] / b \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (305)$$

İki tip kızgın tel anemometresi vardır; sabit sıcaklık ve sabit akım.

Sabit Sıcaklık Kızgın Tel Anemometresi: Tel sıcaklığını sabit tutmak üzere elektrik akımın ayarlanabildiği anemometredir. Akışkan hızı elektrik akımının ve akış sıcaklığının bir fonksiyonudur,

$$h = a + b v_f{}^c = \frac{I^2 R_w}{A_w\left(T_w - T_f\right)} = f\left(I, T_f\right) \quad (306)$$

Akış sıcaklığı da ölçüldüğünde akışkan hızı sadece akımın bir fonksiyonu olarak kalır.

Sabit Akım Kızgın Tel Anemometresi: Tel sabit bir akım altında bırakılır ve akışkan hızı telin ve akışkanın sıcaklığına bağlı bir fonksiyon olarak elde edilir.

$$a + b v^c{}_f = \frac{I^2 R_{ref}\left[1+\alpha\left(T_w - T_{ref}\right)\right]}{A_w\left(T_w - T_f\right)} = g\left(T_w, T_f\right) \quad (307)$$

Eğer akış hızı bağımsız olarak ölçülebilirse akışkan hızı sadece tel sıcaklığının bir fonksiyonu olur. Tel sıcaklığı da tel direncine bağlı bir fonksiyondur dolayısıyla akış hızı tel direnciyle de ilişkilendirilebilir.

Pervaneli Anemometre

Anemometre pervanesinin dönüş hızı veya frekansının ölçülmesi esasına dayanır. Ölçülen pervane hızı ile hava hızı arasında şu şekilde bir ilişki vardır;

$$V = u \times \tan\alpha \; F \quad (308)$$

V : pervane hızı
u : hava hızı
α : pervane ile akış arasındaki açı
F : hava hızına, pervanenin geometrik özelliklerine ve hava yoğunluğuna bağlı bir fonksiyon

Pervaneli anemometre ve bir başka türü olan kupa anemometreye ait bir örnek Şekil 448'de görülmektedir.



Şekil 448. Pervaneli anemometre örnekleri

Sonik/Ultrasonik/Akustik Tip Hava Hız Ölçerler:

Referans sinyal ile hava içerisinden geçen ultrasonik dalga arasındaki zaman farkını ölçerek hız belirler. Hava akışı, ultrasonik dalganın fazında ileriye ya da geriye kaymaya neden olur. Hareket eden parçaların olmayışı, çok sayıda sıralı ölçüm alabiliyor olması avantajlarıdır.

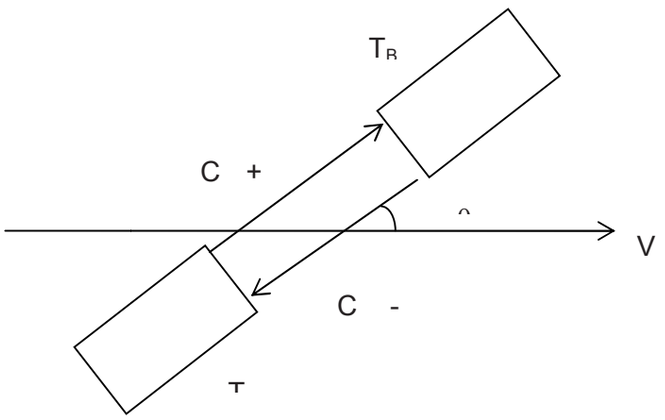
Bu tip anemometreler genel olarak iki fiziksel prensibe dayalı çalışır: Geçiş zamanı (Transit time) ve Doppler etkisi. İlkinde akışkan içerisindeki ultrasonik dalga yayılım hızı, ses hızı ile akışkan hızının vektörel toplamı esas alınır. İkinci prensip ise, hareketli parçacıktan yansıyan akustik dalganın frekans değişimi ölçümüne dayanır. Doppler etkisi prensibine göre çalışan ölçerlerde parçacık yansıması söz konusu olduğundan gazlara kıyasla sıvılarda kullanımı daha iyi sonuçlar verir.



Şekil 449. Sonik hava hız ölçer

Geçiş Zamanı (Transit Zamanı) Yöntemi:

Faz Farkı (Phase Difference, DP) ve Zamanı Farkı (Difference of Transit Time, DT) teknikleri söz konusudur. Geçiş zamanı üzerinden akışkan hızını belirlemek için kullanılan bu teknikte, akışkan içerisinden geçen ve akışkanın kendisinin neden olduğu modifiye edilmiş ultrasonik sinyal hızının ultrasonik transducerler kullanılarak belirlenmesine dayanır. Ultrasonik titreşimler yayıldıkları katı, sıvı veya gaz ortamlarındaki moleküller üzerinde titreşime neden olan, bir noktadan diğer bir noktaya enerjiyi transfer eden mekanik dalgalardır.



Şekil 450. Akışkan hızı ve ses yayılım hızı.

Akışkan içerisinde ilerleyen ultrasonik dalga yayılım hızı kendi doğal yayılma hızı olan ses hızı C ile V akışkan hızının vektörel toplamıdır:

$$\vec{C}' = \vec{C} \pm \vec{V} \tag{309}$$

T_A ve T_B gibi iki transduserin (alıcı/verici) akışkan içerisindeki dalga yayılımı için verici ve alıcı olarak sırasıyla kullanımda olduğunu düşünelim. Doğrudan iletim hızını C'_{AB} ve geri dönen dalganın hızı da C'_{BA} olarak tanımlandığında,

$$\vec{C}_{AB}{}' = \vec{C} + \vec{V} \tag{310}$$

$$\vec{C}_{BA}{}' = \vec{C} - \vec{V} \tag{311}$$

Alıcı/vericiler arası mesafe L ve ilerleme hızları arasındaki ters orantılı eşitlikten yola çıkarak geçiş zamanları belirlenebilir:

$$t_{AB} = L/(C + V\cos\theta) \tag{312}$$

$$t_{BA} = L/(C - V\cos\theta) \tag{313}$$

Zaman Farkı Yöntemi:

Alıcı/vericiler arası ilerleme zamanlarının doğrudan ölçümüne dayanır. Ses hızı ve bu hızı etkileyen sıcaklık, basınç, viskozite ve yoğunluk gibi çevresel parametrelere ihtiyaç olmadan akışkan hızı belirlenebilir zaman eşitlikleri kullanılarak belirlenebilir:

$$V = \frac{L}{2\cos\theta}\left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}}\right) \tag{314}$$

Alıcı/vericilerin dinamik tepkisinden kaynaklana elektronik gecikme zamanı hesaba katılması gereken parametredir. Bu durumda ölçülen geçiş zamanı

$$t^M = t + t^E \tag{315}$$

olarak tanımlanır. Burada t, sinyalin gelene kadar geçen zamanı, t^E ise algılanana kadar geçen zamanı temsil eder. Son haliyle zaman farkı yöntemi (DT) ile akışkan hızı Eşitlik (316) ile belirlenir:

$$V = \frac{L}{2\cos\theta}\left(\frac{1}{t^M{}_{AB} - t^E{}_{AB}} - \frac{1}{t^M{}_{BA} - t^E{}_{BA}}\right) \tag{316}$$

Faz Farkı Yöntemi:

Bu yöntemde, ultrasonik sinyal alıcı/verici çifti arasında sürekli olarak iletilir veya alıcı transdüser tarafından algılanıncaya kadar iletilir. Bundan dolayı, transdüser dinamik tepkisinden kaynaklanan elektronik gecikme ihmal edilebilir. Akışkan hızı, zıt yönlerde iletilen sinyaller arasındaki faz farkı ölçülerek belirlenir.

7.8. AKUSTİK, ULTRASONİK VE TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİ

7.8.1 AKUSTİK - SES BASINCI

7.8.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Akustik ölçümlerinde kullanılan ölçüm büyüklüğü Ses Basıncı'dır. Ses basınç birimi SI Birimler sisteminde türetilmiş bir birim olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle temel SI birimlerinden farklı olarak CIPM tarafından beyan edilen bir tanıma sahip değildir.

Geleneksel olarak akustik ölçümlerinden bahsedildiğinde ilk akla gelen birim desibel'dir. Ancak desibel (dB) bağıl bir birim olup SI broşüründe SI olmayan birim olarak tanınmaktadır. Ses basınç düzeyi (SPL) desibel cinsinden Eşitlik (317) ile hesaplanır:

$$\mathrm{SPL\ [dB]} = 20 \log \frac{p}{p_0} \qquad (317)$$

SPL : Ses basınç düzeyi [dB]

p : Ses basıncı [Pa]

p_0 : Referans ses basıncı [20 μPa]

Desibel ölçeğinde referans değer; ses basıncı için 1000 Hz'de insan kulağının ortalama duyma eşiği 20 μPa olup, 0 dB'e karşılık gelir. İnsan kulağının acı eşiği için ses basıncı 200 Pa olup, 140 dB'e denk gelir.

Akustik ölçümlerde birincil standardın hangi şekilde oluşturulmasının uygun olacağı konusunda yıllar boyunca araştırmalar sürdürülmüştür. Araştırmalar sonucunda karar verilmesi gereken husus akustik ölçümlerde referans kabul edilebilecek nesnenin bir ses kaynağı mı, yoksa ses algılayıcısı mı olmasıydı. Ses kaynakları olarak düşünülen araçlar termofon, pistonfon vb. olup, ses algılayıcıları da ses basıncını elektriksel sinyallere dönüştüren araçlar, mikrofonlardır. Pistonfonların ürettikleri ses basıncının mutlak olarak hassas bir şekilde belirlenmesi veya mikrofonların ses basıncını elektriksel gerilime dönüştürme katsayısının (mikrofon hassasiyeti) bulunması, bir başka deyişle mikrofon ve pistonfon kalibrasyonlarının olabilecek en düşük belirsizlikle yapılabilmesi akustik metrolojisinde gündemde olan en önemli konuydu.

Günümüzde akustik ölçümler alanında yoğun bir şeklide kullanılan kapasitif mikrofonlar 1916 yılında E.C. Wente tarafından Bell Laboratuvarında tasarlanmış ve üretilmiştir [297]. Ayrıca bu tip mikrofonların kalibrasyonu için pistonfon yapımını gerçekleştirmiştir. Kapalı hacim içerisindeki pistonun hareket etmesi sonucu oluşan hacim farkının yaratacağı ses basıncı hesaplanarak mikrofonun kalibrasyonu gerçekleştirilebilmektedir.

20.yüzyılın ortalarına kadar mikrofon kalibrasyonu açısından birçok yöntem geliştirilmiş ve bunun sonucu olarak Fransa'da termofon kalibrasyon yöntemi akustik ölçüm standardı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Temel olarak bu kalibrasyon sisteminin prensibi, bir iletkene uygulanan AC akımın iletken tel üzerinde oluşturacağı ısının ölçülmesine dayanmaktadır. İletken malzemeyi çevreleyen havanın ısınması sonucu oluşacak periyodik hava genleşmesi ses dalgalarının oluşmasını sağlamış olur.

Bu süre zarfında kullanılan diğer bir kalibrasyon yöntem ise Rayleigh disk yöntemidir. Bu kalibrasyon yöntemine göre Rayleigh diski olarak adlandırılan hafif dairesel bir disk ince bir kablo yardımı ile merkezinden asılarak konumlandırılır. Havada asılı şekilde bulunan disk düzleminin normaline uygulanan hava akımı diskin kendi etrafında dönmesine sebep olmaktadır. Disk alternatif bir hava akımına maruz kaldığında yer değiştirme eğilimi sabit bir

şekilde devam edecektir. Bu şekilde ses dalgalarının parçacık hızının ölçülmesi mümkün olacaktır. Diskin yer değiştirmesi sonucu elde edilen parçacık hızı ile mikrofon kalibrasyonunun gerçekleşmesi söz konusu olabilmektedir.

Amerika'daki Ulusal Standartlar Bürosunda (National Bureau of Standards) geliştirilen diğer bir yöntem ile bilinen bir ses kaynağına gerek duyulmadan mikrofon kalibrasyonun gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem, karşılıklılık (reciprocity) yöntemi olarak adlandırılır. Özel kapasitif mikrofonların hem alıcı, hem de verici olarak aynı hassasiyet düzeyine sahip olmaları esasına dayanmaktadır.

Termofon ve Rayleigh disk ile edilen ölçüm belirsizliği karşılıklılık yöntemine göre daha yüksek değerlere sahip olduğundan, karşılıklılık kalibrasyon yöntemi Uluslararası Elektroteknik Komitesi IEC 327 standardına göre birincil mikrofon kalibrasyon yöntemi olarak belirlenmiştir. Yıllar içinde IEC standardı revize edilmiş ve kapasitif mikrofonların kalibrasyonları için birincil kalibrasyon yöntemi olarak kullanılmakta olan IEC 61094-2 standardına dönüşmüştür [298]. Standart, karşılıklık kalibrasyon yönteminin en ayrıntılı şekilde tarif etmektedir. Böylece, akustik ölçümlerinde ses basıncı standardının karşılıklık yöntemi ile kalibrasyonu yapılmış mikrofon üzerinden oluşturulması tüm metroloji enstitüler tarafından kabul görmüştür.

Farklı üreticiler tarafından çok çeşitte mikrofon üretilmektedir. Bu mikrofonlar, boyut, dinamik çalışma ve frekans aralığı ile kullanım alanlarına göre değişiklik gösterebilir (Şekil 451) [299] .



Şekil 451. Kapasitif mikrofon tipleri

Ses basıncı standardı, herhangi bir tip mikrofonun kalibrasyonu üzerinden değil, referans standart niteliğindeki mikrofonların karşılıklık kalibrasyonu yöntemiyle gerçekleştirilir. Akustik metrolojisinde kullanılan mikrofonların hiyerarşisi IEC 61094-1 [300] standardında tanımlanmıştır. Birincil standart olarak kullanılabilecek mikrofonlar LS1p veya LS2p simgeleri ile gösterilmektedir. LS kısaltması, laboratuvar standardı, 1p ve 2p ise sırasıyla 1 ve 2 inç çapındaki basınç ifadelerinden atanmıştır. Referans standart niteliğindeki kapasitif mikrofon ses basıncı etkisinde iken diyaframı titreşir ve mikrofonun elektriksel kapasitansı değişir. Kapasitansın değişimi, mikrofonun elektriksel terminallerindeki değişken gerilim olarak algılanır. Aynı zamanda mikrofonun elektriksel terminallerine değişken gerilim uygulandığında yine mikrofonun diyaframının hareketi nedeniyle mikrofon bir ses kaynağı gibi çalışır. Böylece kapasitif mikrofonlar hem alıcı hem de verici olarak kullanılabilirler. Kapasitif mikrofon yapısı Şekil 452'de gösterilmiştir [301].



Şekil 452. Kapasitif mikrofonun yapısı

Matematiksel olarak kapasitif mikrofonun davranışı Eşitlik (318) ve (319) ile belirlenir:

$$z_{11} i + z_{12} q = V \quad (318)$$

$$z_{21} i + z_{22}\, q = p \quad (319)$$

p	: mikrofonun diyaframına etkiyen ses basıncı
V	: mikrofonun elektriksel terminallerindeki açık devre gerilimi
q	: mikrofonun diyaframının ortamda oluşturduğu hacim hızı
i	: mikrofonun elektriksel terminallerinden geçen akım
$z_{11}=Z_e$	: mikrofonun elektriksel empedansı
$z_{22}=Z_a$	: mikrofonun akustik empedansı
$z_{12}=z_{21}=S_pZ_a$	: sırasıyla mikrofonun düz ve ters transfer empedansı
S_p	: mikrofonun basınç hassasiyeti, ses basıncı etkisinde iken mikrofonun terminallerinde oluşan gerilimin ses basıncına oranı

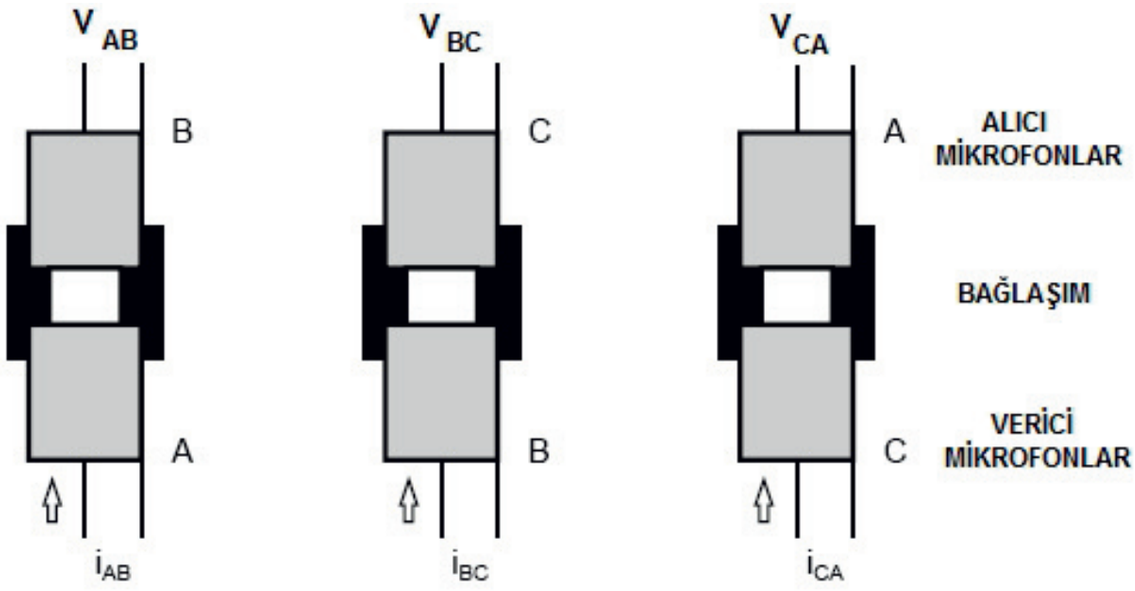
Mikrofonun hassasiyeti dB (ref 1 V/Pa) cinsinden ifade edilir.

Yukarıdaki eşitliklerde kapasitif mikrofona ait dönüştürme katsayıları z_{12} ve z_{21} arasında $z_{12} = \pm z_{21}$ bağlantısı sağlandığında, mikrofonların karşılıklı (reciprocal) olduğu söylenir. Laboratuvar standartları olarak kullanılan kapasitif mikrofonlar karşılıklı mikrofonlardır.

IEC önerilerine uygun olarak tüm metroloji merkezlerince birincil standart olarak Brüel & Kjaer (Danimarka) firması tarafından üretilen 1” çapında Tip 4160 ve 1/2” çapında Tip 4180 mikrofonları kullanılmaktadır. Bunun nedenleri olarak bu tür mikrofonların oldukça yüksek hassasiyetleri, kararlılıkları ve ortam şartlarındaki değişimlere dayanıklılıkları gösterilebilir.

Laboratuvar standart mikrofonların birincil kalibrasyonları, karşılıklık yöntemiyle yapılmaktadır. Bu kalibrasyondaki amaç, ses basıncı etkisi altındaki mikrofonun çıkış terminallerinde oluşan

gerilimi ölçmek ve mikrofonun hassasiyetini düşük belirsizlikle belirlemektir. Kalibrasyonda kullanılan üç mikrofon, ikili kombinasyon şeklinde birisi alıcı, diğeri ise verici olarak bir kapalı hacim içinde Şekil 453'de gösterildiği gibi birleştirildiğinde, alıcı mikrofonun terminallerindeki açık devre geriliminin verici mikrofondan geçen akıma oranı, V/i ölçülür.



Şekil 453. Karşılıklık kalibrasyon sırasında mikrofon ve bağlaşımların birleşimi [301]

S_{pA} ve S_{pB} basınç hassasiyetlerine sahip iki mikrofon Şekil 453'de gösterildiği gibi bir bağlaşım yardımıyla birleştirildiğinde, Eşitlik (318)'e uygun olarak verici mikrofondan geçen i_{AB} akımı, $q = S_{pA}\, i_{AB}$ değerinde kısa-devre (p=0) hacim hızına neden olacaktır. Bunun sonucunda alıcı mikrofonun diyaframı $p_B = (Z_{ak})_{AB}\, S_{pA}\, i_{AB}$ ses basıncı etkisinde kalacaktır ve alıcı mikrofonun elektrik terminallerinde;

$$V_{AB}=S_{pB}\, p_B=S_{pB}\, S_{pA}\, (Z_{ak})_{AB}\, i_{AB} \qquad (320)$$

değerinde açık devre gerilimi oluşacaktır. Son ifadeyi diğer bir şekilde de yazabiliriz:

$$S_{pB}S_{pA} = \frac{1}{(Z_{ak})_{AB}}\frac{V_{AB}}{i_{AB}} \qquad (321)$$

Eşitlikteki V_{AB}/i_{AB} oranı, A ve B mikrofonları ve bağlaşımdan oluşan sistemin elektriksel transfer empedansı, $(Z_{ak})_{AB}$ ise sistemin akustik transfer empedansı olarak adlandırılır. Böylece Eşitlik (321)'den görüldüğü gibi iki mikrofonun hassasiyet çarpımı, akustik transfer empedans ile elektrik transfer empedansının çarpımına eşittir. Bir başka deyişle, elektrik ve akustik transfer empedanslarının değerleri belirlendiğinde, iki mikrofonun hassasiyetleri çarpımının sonucu bulunur.

Mikrofonların elektrik transfer empedansları çeşitli yöntemlerle doğrudan ölçülebilir. İki mikrofon ve bağlaşımdan oluşan sistemin akustik transfer empedansı ise sistemin geometrisi dikkate alınarak hesaplanır.

$$\frac{1}{(Z_{ak})_{AB}} = \frac{1}{(Z_{ak})_{A}} + \frac{1}{(Z_{ak})_{B}} + \frac{1}{(Z_{ak})_{cp}} \qquad (322)$$

$(Z_{ak})_A$: A mikrofonun akustik empedansı

$(Z_{ak})_B$: B mikrofonun akustik empedansı

$(Z_{ak})_{cp}$: bağlaşımın akustik empedansı

Üç mikrofonla değişik alıcı-verici kombinasyonları için, mikrofonların hassasiyet çarpımları ($S_{pA}\cdot S_{pB}$, $S_{pA}\cdot S_{pC}$ ve $S_{pB}\cdot S_{pC}$) elde edilir. Bir başka ifadeyle, üç bilinmeyenli denklem sistemi oluşacaktır. Bu denklem sistemi çözüldüğünde her bir mikrofonun hassasiyetinin mutlak değeri hesaplanır:

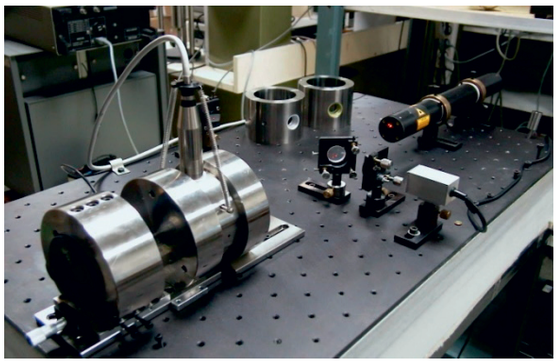
$$S_{pA} = \sqrt{\frac{[S_{pA}S_{pB}]\times[S_{pA}S_{pC}]}{[S_{pB}S_{pC}]}} \qquad (323)$$

kalibrasyonda kullanılan diğer iki mikrofonun da hassasiyet değerleri benzer bir şekilde bulunur. Eşitlik (323)'a uygun olarak hesaplanan S_{pA}, S_{pB} ve S_{pC} değerlerine, ortam şartları ve diğer fiziksel koşullardan (dalga hareketi, ısı iletimi, kılcal tüp vb.) gelen düzeltme terimleri ilave edilerek, her bir mikrofona ait düzeltilmiş açık devre hassasiyet değerleri elde edilir.

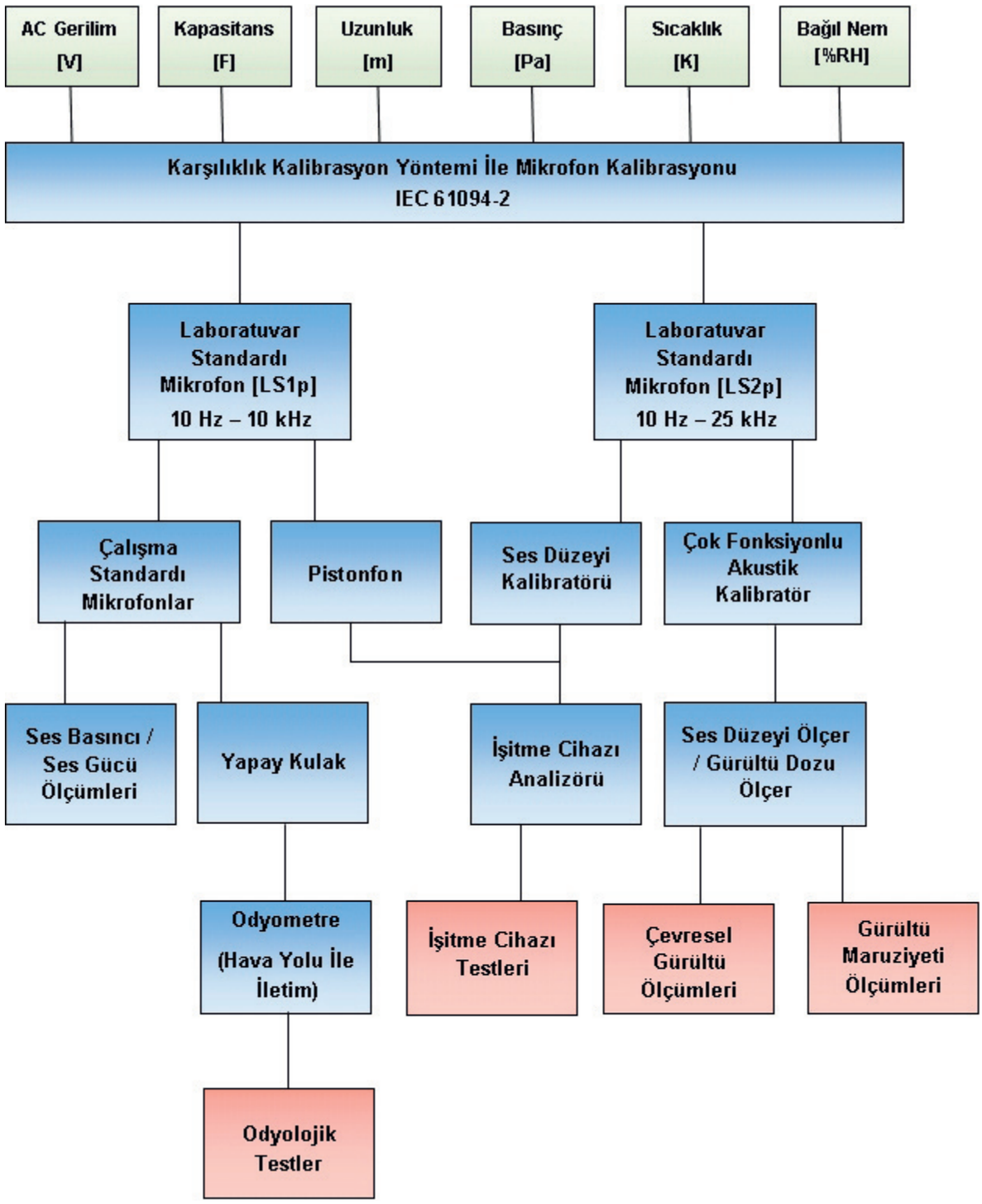
Gelişmiş metroloji enstitüler tarafından ses basınç birimi oluşturulmasında elde edilen en düşük belirsizlik değeri 0,03 dB – 0,10 dB aralığında değişim göstermektedir. Standartlar, kullanılan mikrofon tipine bağlı olarak (LS1p veya LS2p) 1 Hz -10 kHz veya 1 Hz – 31,5 kHz frekans aralığını kapsamaktadır.Şekil 455'de akustik ölçümlerindeki izlenebilirlik zincirinden de görüldüğü gibi karşılıklık yöntemiyle gerçekleştirilen kalibrasyon sonucunda ses basınç biriminin birçok temel ve türetilmiş SI birimlerinin standardına bağlantısı vardır.

Karşılıklık kalibrasyon yönteminin yaygın kullanılmasına rağmen bazı metroloji enstitülerde düşük frekans bölgesinde farklı yöntemler de uygulanmaktadır. Bunların en bariz örneği lazer pistonfonudur [302]. Lazer pistonfonu kapalı silindir şeklindeki bir bağlaşım içerisinde eksen boyunca periyodik şekilde doğrusal olarak hareket eden dairesel kesitli bir pistonun yerdeğiştirmesi ile ses basıncı oluşturan bir ses kaynağıdır. Bağlaşım içerisinde üretilen ses basınç düzeyi, lazer enterferometre kullanılarak belirlenir. Lazer pistonfonu genel olarak 250 Hz'in altındaki frekanslarda kullanılmasına rağmen, kalibrasyon yöntemi henüz resmi olarak IEC tarafından standart yöntem olarak kabul edilmemiştir.

Yöntemin standart olarak kabul görmesi için birkaç metroloji enstitü tarafından uygulanması ve de farklı ülkelerdeki lazer pistonfonları arasındaki denklik derecelerinin uluslararası karşılaştırmalar yoluyla belirlenmesi gerekmektedir. Lazer pistonfonu Şekil 454'de gösterilmiştir.



Şekil 454. Lazer pistonfonu



Şekil 455. Akustik ölçümlerde izlenebilirlik zinciri

7.8.1.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Ses basınç birimi birincil seviyede oluşturulduktan sonra alt seviyelere aktarımı çeşitli cihazların kalibrasyonları ile yapılmaktadır. Bunlar;

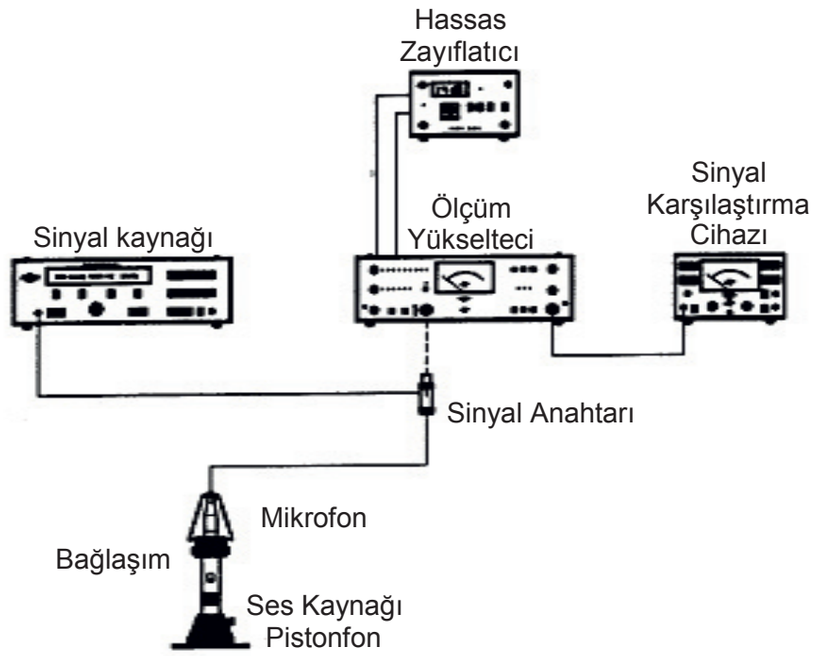
- Çalışma Standardı Mikrofonlar
- Ses Kaynakları / Pistonfonlar / Çok Fonksiyonlu Akustik Kalibratörler
- Yapay Kulak
- Yapay Mastoid

Ses basınç birimi izlenebilirliğinin alt seviyeye aktarımı

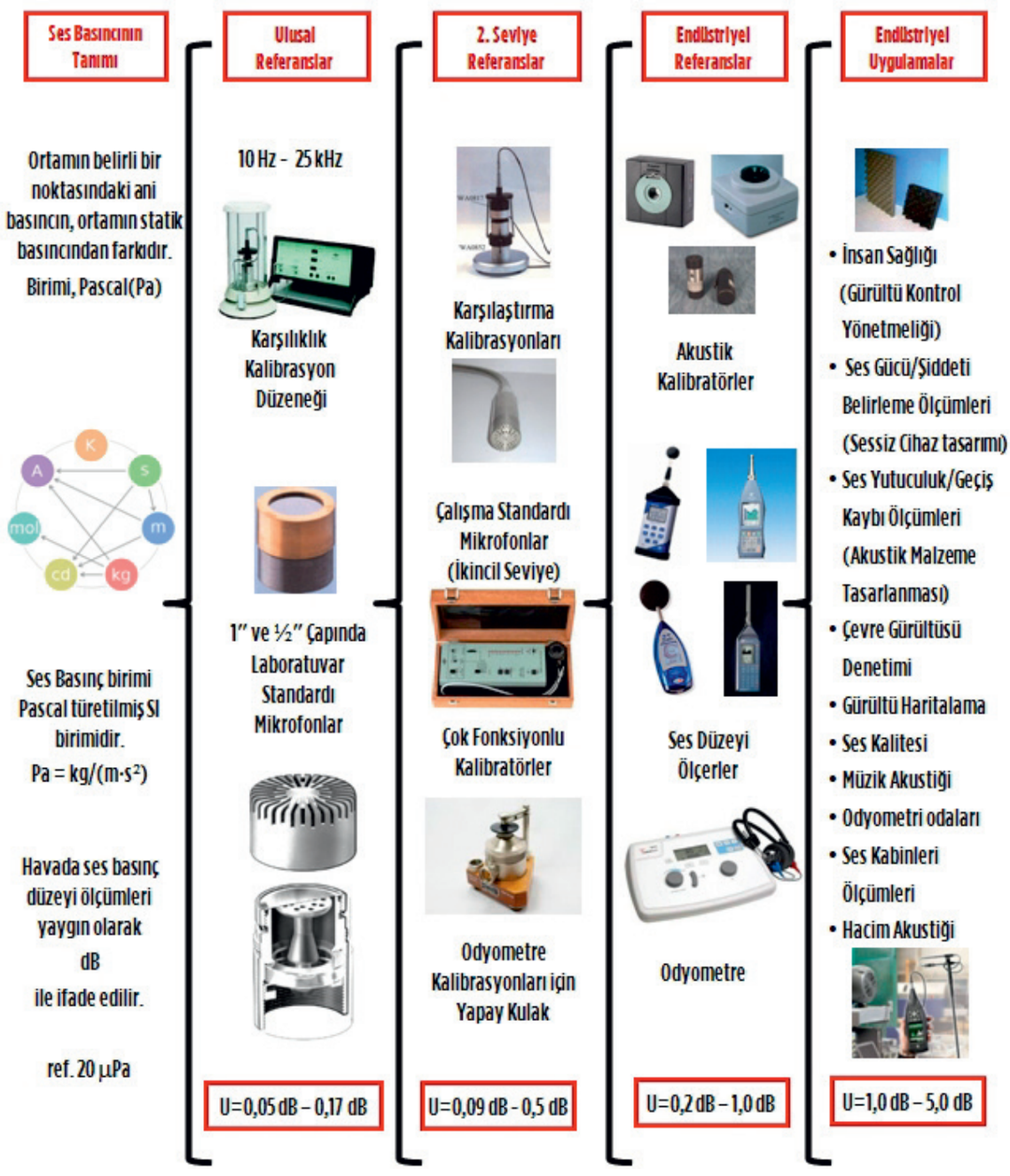
Şekil 457'de gösterilmiştir. Birimin alt seviyeye aktarımı amacıyla kullanılan kalibrasyon yöntemlerinin büyük çoğunluğu, uluslararası kuruluşlar tarafından hazırlanan standartlarda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu standartlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- TS EN IEC 61094-5: "Ölçme Mikrofonları-Bölüm 5: Standart Mikrofonların Karşılaştırma Yoluyla Basınç Kalibrasyonu için Kullanılan Metotlar"
- TS EN 60942 "Elektroakustik - Ses Kalibratörleri"
- TS EN 61672-2 "Elektro-akustik – Ses seviye ölçerleri – Bölüm 2: Patern değerlendirme deneyleri"

Şekil 457'de gösterilen aktarımında örnek olarak çalışma standardı mikrofonlarının kalibrasyonu ele alınabilir. Çalışma standardı mikrofonların kalibrasyonları LS1p tip referans mikrofonlarla karşılaştırma yöntemiyle yapılmaktadır. Kalibrasyon sırasında aracı olarak bir ses kaynağı, pistonfon, kullanılmaktadır. Kalibrasyon için Şekil 456'da şematik olarak gösterilmiş olan düzenek kullanılmaktadır.



Şekil 456. Mikrofonların karşılaştırma kalibrasyonu düzeneği



Şekil 457. Ses basıncı izlenebilirliğinin alt seviyelere aktarımı

Kalibrasyonda referans olarak kullanılan mikrofonun açık devre hassasiyet değeri kullanılarak kalibrasyonu yapılmak istenen çalışma standardı mikrofonun hassasiyeti Eşitlik (324) ile hesaplanmaktadır.

$$S_{1013} = S_{ref} + \Delta + \sum \delta_i \qquad (324)$$

S_{1013} : Kalibrasyonu yapılan mikrofonun referans ortam koşullarına düzeltilmiş açık devre hassasiyeti,

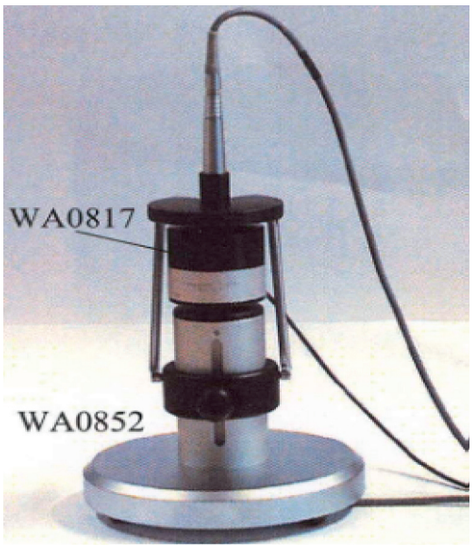
S_{ref} : Referans mikrofonun açık devre hassasiyeti,

Δ : Aynı ses basıncı etkisinde iken referans ve kalibrasyonu yapılan mikrofonların çıkış gerilimleri arasındaki fark,

δ_i : Ortam şartları, hacim yüklemesi ve diğer koşullardan kaynaklanan düzeltme

Ses kaynağı olarak pistonfon kullanıldığında çalışma standardı mikrofonların kalibrasyonu sadece pistonfonun çalışma frekansında yapılabilmektedir. Kalibrasyonun geniş frekans bölgesinde yapılması için değişik araçlar; örneğin Şekil 458'de gösterilen aktif bağlaşımlar kullanılmaktadır.

Akustik kalibratörlerin, odyometre kalibrasyonlarında referans olarak kullanılan yapay kulak, çevresel gürültü ölçümlerinde kullanılan ses düzeyi ölçerler ve Şekil 455'deki izlenebilirlik zincirinde gösterilen diğer cihazların performans karakteristikleri doğrudan veya dolaylı olarak referans mikrofonların açık devre hassasiyetine, böylece SI birimlerine izlenebilirdir.



Şekil 458. Mikrofon kalibrasyonları için aktif bağlaşım [303]

7.8.2 ULTRASONIK GÜÇ

Lazzaro Spalloni 1794 yılında etrafımızda duyulmayan sesin olduğunu ve yarasaların yönlerini bu ses dalgalarıyla bulduklarını ortaya attı. 1800'lerin başında Johan Christian Doppler, sesin hareket ettiğinde frekansının değiştiğini kanıtladı. 1880'de Pierre ve Jacques Currie, piezo-elektrik etkiyi tanımladı ve ultrasonik dönüştürücü geliştirdi. 1938'de Donald Griffin ve Robert Gallambo, yarasanın çıkardığı sesi bir alıcı ses detektörü ile kaydetti. 1900'lerin başında SONAR geliştirildi. 1915'de Paul Langevin, sualtı ölçümleri için hidrofonu ve 1928'de Sergei Sokolov ultrasonik hata detektörünü keşfetti. 1940'larda ultrasonik tıpta kullanılmaya başladı. 1942'de ultrasoniğin görüntüleme amacıyla kullanımı başladı. Günümüzde tıpta teşhis ve tedavide, endüstride ve birçok alanda ultrasonik teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır.

7.8.2.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Ultrasonik, akustik frekans bölgesinin bittiği 20 kHz'ten başlayıp 150 MHz frekansına kadar olan aralığı kapsar. Ultrasonik dalga, enerjisini ilerleyerek iletir. Ultrasonik güç, yöne bağımlı olmaksızın bir saniyede toplam iletilen dalganın enerjisi olarak tanımlanır ve Watt (kg m^2/s^3) birimi ile ölçülür. Ultrasonik Güç, "Şiddet x Alan" olarak ifade edilir. Şiddet, dalganın büyüklüğünü tanımlar. Ultrasonik güç, birimi SI Birimler sisteminde türetilmiş birim olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle temel SI birimlerinden farklı olarak CIPM tarafından beyan edilen bir tanıma sahip değildir.

Ultrasonik radyasyon kuvveti, saf su içerisinde hedef olarak adlandırılan yutuculuğu veya yansıtıcılığı yüksek bir malzeme üzerine (veya bir sınır yüzeye) etkiyen kuvvetin zamana göre ortalaması olarak tanımlanır. Ultrasonik dalga, akustik özellikleri iyi belirlenmiş, yeterli bir yüzey alanına sahip uygun bir hedefe gönderilir ve etkiyen kuvvetin zamana göre ortalaması ölçülür. Ultrasonik güç, radyasyon kuvveti değeri kullanılarak teorik olarak hesaplanır.

7.8.2.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

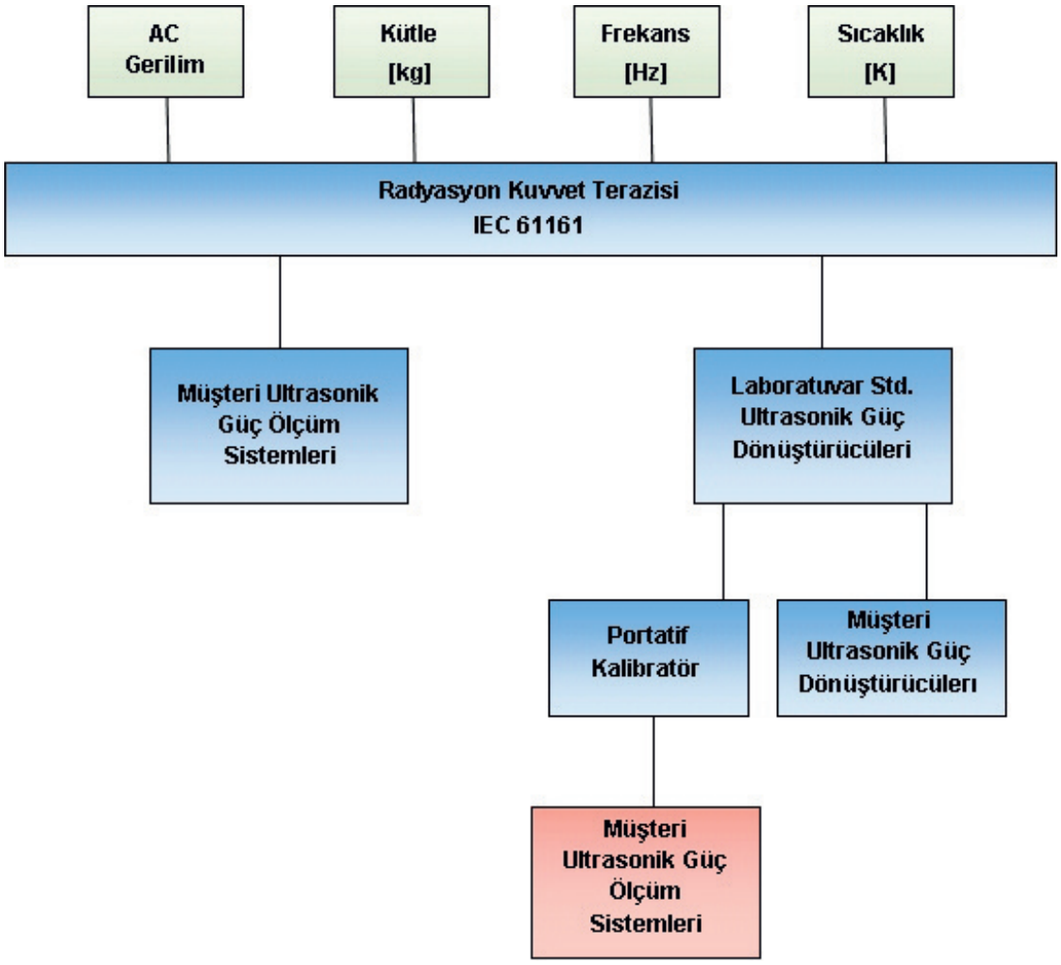
Ultrasonik güç ölçüm yöntemi IEC 61161'de tanımlanan Radyasyon Kuvvet Terazisi yöntemidir [304]. Bu sistemde IEC 61157 ve IEC 61689 standartlarında tanımlanmış tıp alanında teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan ultrasonik cihaz ve dönüştürücülerin kalibrasyonları, 1 MHz – 15 MHz aralığındaki frekans bölgesinde ve 1mW – 20 W güç aralığında yapılmaktadır.

Frekans Bölgesi : 1 MHz – 15 MHz

Ultrasonik Güç : 1 mW – 200 mW teşhis amaçlı kullanılan proplar

: 1 W – 20 W tedavi amaçlı kullanılan proplar

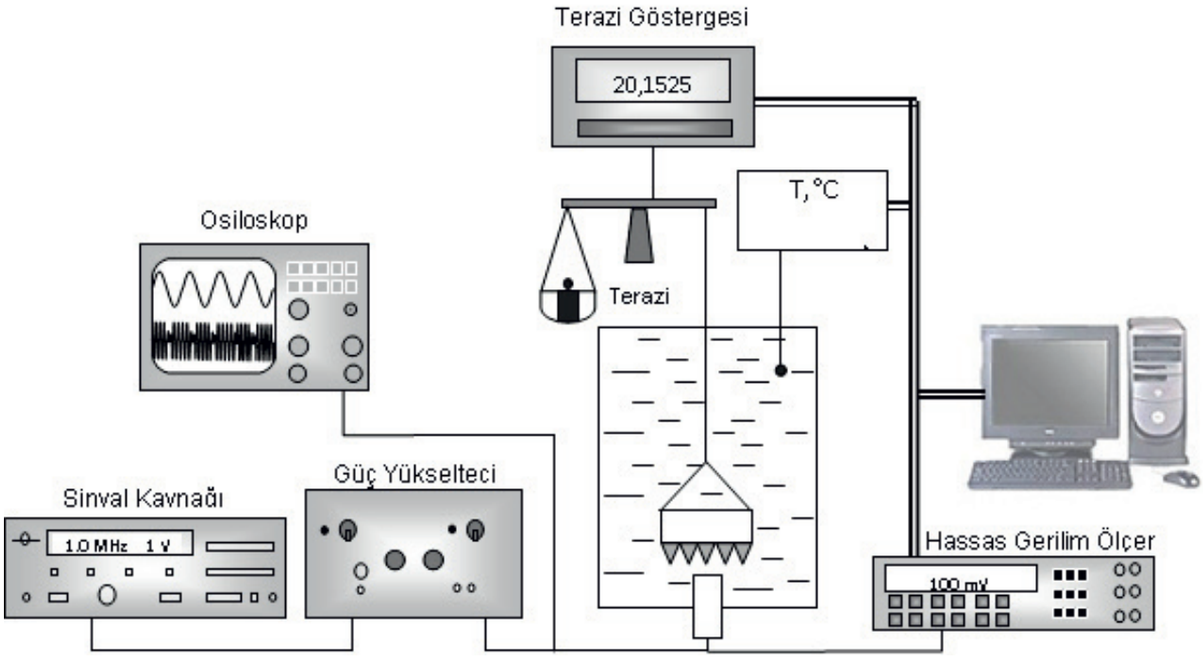
Ultrasonik alanında kullanılan izlenebilirlik Şekil 259'da verilmiştir.



Şekil 459. Ultrasonik alanında kullanılan izlenebilirlik şeması

Ultrasonik Yayınımın Yukarı Olduğu Düzenek

Şekil 460 ve Şekil 461'de gösterilen bu düzenekte maksimum yük kapasitesi 25 gram ve çözünürlüğü 10 µg olan Sartorius 4401 MP8 terazi kullanılmıştır. 0,014 mW – 1500 mW aralığındaki ultrasonik güçler, diğer bir deyişle 0,010 mg – 104 mg arası ağırlık değişimleri ölçülebilmektedir. Yutucu hedefin çapı 100 cm'dir. Hedef, radyasyon kuvvetini ağırlık cinsinden ölçen bir mikro-balans terazinin kefesine Şekil 460'da görüldüğü gibi ince bir tel ile bağlanmıştır. Telin mikron mertebesinde ince ve tercihen Pt-Ir olması, su ile temas ettiği noktada oluşan birleşim kuvvetlerinin en aza indirilmesi açısından gereklidir. Rezonans frekansı belirlenmesi için yüksek yansıtıcı hedef de asılabilmektedir.



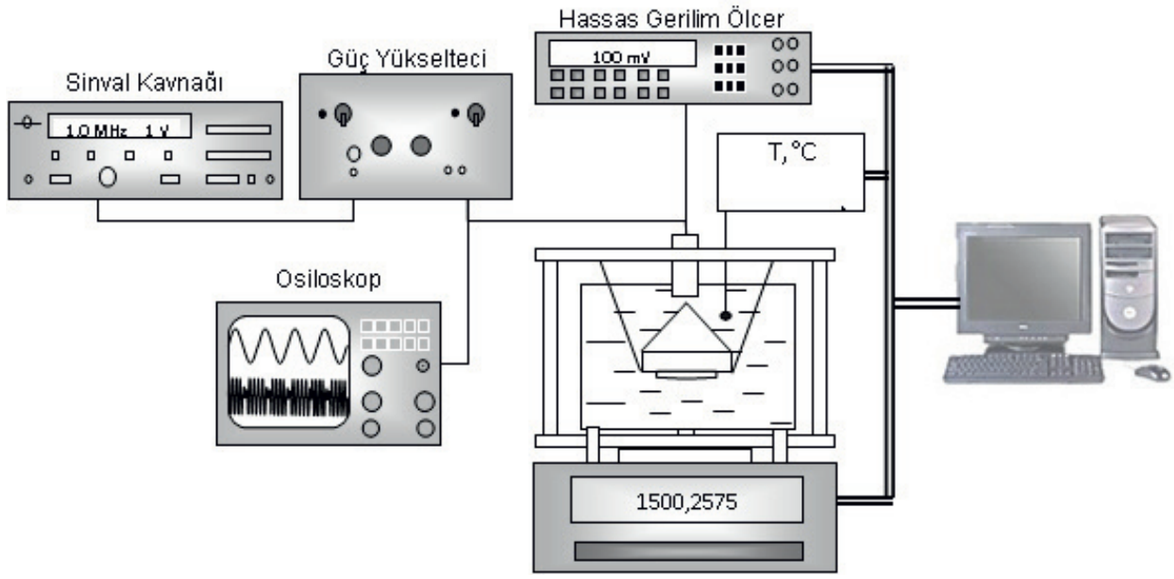
Şekil 460. Ultrasonik güç ölçüm düzeneği: Ultrasonik yayınım yukarı doğru



Şekil 461. TÜBİTAK UME'de kurulu ultrasonik güç ölçüm düzeneği

Ultrasonik Yayınımın Aşağı Olduğu Düzenek

Şekil 462'de gösterilen bu düzenekte maksimum yük kapasitesi 2300 g ve çözünürlüğü 100 µg olan Mettler Toledo PR 2004 Comparator terazi kullanılmıştır. 0,1 W - 20 W aralığındaki ultrasonik güçlerin ölçümü yapılabilmektedir. Yansıtıcı hedefin çapı 100 cm'dir. Yüksek yutucu hedef asılabilmektedir.



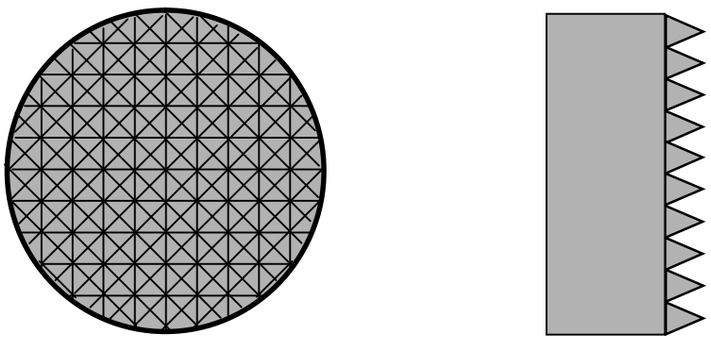
Şekil 462. Ultrasonik güç ölçüm düzeneği: Ultrasonik yayınım aşağı doğru

Ultrasonik Yayınımın Aşağı ve Yutucu Hedefin Havuz Tabanında Olduğu Düzenek

Şekil 462'deki havuz içerisinde asılı hedef çıkarılarak havuz tabanına tam yansıtıcı hedefin yerleştirildiği düzenektir. Yüksek güçlü propların ölçümünde kullanılmaktadır.

Hedef Özellikleri

Hedef özellikleri IEC 61747:1992 standardında belirtilmiştir. Akustik yutuculuğu yüksek ve yansıtıcılığı düşük lastik ve içinde değişen miktarlarda ve büyüklüğü mikron mertebelerinde yutucu cam parçacıkları bulunmaktadır. Şekil 463'de görüldüğü gibi, yutucu ön yüzeyinin piramit yapıda olması yutuculuğu arttırmaktadır.



Şekil 463. Tam yutucu hedef

Yoğunluğu suyun yoğunluğuna yakın ve yüksek olması, empedansının suyun akustik empedansı olan $1{,}48\times10^{6}$ kg/(m^2 s) civarında olması gerekmektedir. Yutucu hedef, ultrasonik prop çapından en az 1,5 - 2 kat büyüklüğünde tasarlanmalıdır [305]. Tam yansıtıcı hedef yüzey kalitesi en az üç üçgen mertebesinde düzgün paslanmaz çelik malzeme ve cam kombinasyonundan üretilmiştir. Sadece paslanmaz çelik ya da sadece camdan da üretilebilir. Şekil 462'de görülen tam yutucu ve tam yansıtıcı hedefler TÜBİTAK UME'de üretilmiştir. NPL (National Physical Laboratory-İngiltere) tarafından üretilen yutucu hedeflerin geçiş kaybı 32 dB - 38 dB ve yansıma azaltması 36 dB - 44 dB değerleri civarındadır [306].

ÖLÇÜMLER

Rezonans Frekans Belirlenmesi

Birçok dönüştürücünün rezonans frekansında çalıştırılması uygun görülmez hatta tehlikeli bulunurken, ultrasonik dönüştürücüler yüksek güç üretmeleri için rezonans frekansında çalıştırılırlar. Bu yüzden ultrasonik dönüştürücülerin rezonans frekansı yüksek doğrulukla belirlenmelidir. Rezonans frekansı elektriksel yöntemlerle belirlenebilir. Ancak daha çok kullanıma sahip yöntem radyasyon kuvvet terazisinde tam yansıtıcı hedef kullanılarak frekans taraması yöntemidir. Dönüştürücünün tahmin edilen nominal rezonans frekansı bölgesi, küçük, örneğin 100 Hz (daha hassas tarama için 10 Hz) aralıklardaki frekanslarda taranıp, en yüksek güç ürettiği bölge hem artan hem de azalan frekanslarda belirlenir. Belirlenen iki frekansın ortalaması rezonans frekansını verir. Tam yansıtıcı hedefin, proba olabildiğince (1 mm) yakın konumlandırılması önerilir. Rezonans frekansının tam yutucu hedef ile düşük belirsizlikle belirlenmesi, yutucu hedefin sıcaklık genleşme katsayısının yüksek olmasından dolayı oldukça zordur.

Gerilim Ölçümleri

Proba uygulanan AC gerilim yüksek doğrulukta ölçülebilmelidir. Bunun için ya yüksek empedans prob ya da ısıl dönüştürücü (thermal converter) kullanılmaktadır. Isıl dönüştürücü yönteminin belirsizliği daha düşük olduğu için tercih edilmektedir. Isıl dönüştürücüden kaynaklanan belirsizlik bileşeni % 0,5 olup, yüksek empedans prop kullanıldığında ve kalibrasyonu yapılmış bir DVM ile belirsizlik % 1 mertebelerinde elde edilebilmektedir [307][308].

Güç ölçümleri

Ultrasonik radyasyon kuvveti, saf su içerisinde hedef olarak adlandırılan yutuculuğu veya yansıtıcılığı yüksek bir malzeme üzerine gönderilir ve hedef üzerinde oluşturulan alan ölçülür. Hedef üzerine ultrasonik gücün uygulandığı ve uygulanmadığı durumlardaki değişim belirlenir. Ultrasonik gücün uygulama zaman aralıkları (15 – 35) saniye arasında değişebilir. Ölçümün yaklaşık 6 kez yapılması önerilir. Ultrasonik gücün açılıp kapandığı durumlardaki hedefin ağırlık değişiminin ortalaması, **m**, alınır.

Hesaplamalar

İdeal yutucu bir hedef için **ultrasonik güç,**

$$P = c \times F = c \times m \times g \quad (325)$$

İdeal yansıtıcı bir hedef için **ultrasonik güç,**

$$P = c \times F / (2 \cos^2\alpha) = c \times m \times g \ / (2 \cos^2\alpha) \quad (326)$$

c : Ultrasonik hız (23 °C'de 1491,19 m/s) [m/s]

m : Hassas terazide ölçülen ağırlık değişimi [g]

g : Yerçekimi ivmesi (9,8023 m/s^2)

α : Ultrasonik dalganın yönü ile yansıtıcı hedef yüzeyinin normali arasındaki açı (45 °)

Radyasyon Yayınımı (Radiation Conductance)

Ultrasonik dönüştürücüyü en iyi karakterize eden özelliği, radyasyon yayınım değerinin ölçülmesidir. Radyasyon yayınımı G, Eşitlik (327) ile belirlenir.

$$G = \frac{P}{U^2} \quad (327)$$

G : Radyasyon yayınımı [S]

P : Ölçülen güç [W]

U : Uygulanan gerilim [V]

7.8.3 TİTREŞİM - İVME

Günümüzde mekanik titreşim ve oluşturduğu yan etkiler, insan sağlığını, cihaz ve makinelerin kullanım sürelerini etkileyen önemli bir faktör olmaktadır. Asfalt kesmekte kullanılan havalı kompresörler, bahçelerde kullanılan çapa makineleri, matkaplar vb. insan sağlığını doğrudan etkileyebilen titreşim kaynaklarıdır. Yüksek titreşim seviyesine maruz kalan bir kişinin sağlığında, zaman içinde bazı geri dönüşü olmayan rahatsızlıklar ortaya çıkmaktadır. El sinirlerindeki his kaybı olarak bilinen beyaz el rahatsızlığı buna örnek olarak verilebilir.

Maruz kalınan titreşim dozu ya da çalışan bir makinenin oluşturduğu titreşim ölçülerek belirlenebilir. Yapılan titreşim ölçümlerinin güvenirliği ve doğruluğu, büyük bir ölçüde kullanılan cihaz ve dönüştürücülerin kalibreli olmasına bağlıdır. Kullanılan cihazlarla birlikte insanın maruz kaldığı titreşim ve şokları doğru olarak ölçmedeki ihtiyacın artması, titreşim ve şok dönüştürücülerinin kalibrasyonunun önemini ön plana çıkartmıştır.

Periyodik titreşim, parçacığın veya cismin bir referans konum etrafındaki salınım hareketi olarak tanımlanabilir. Bu hareket, titreşim periyodu (T) olarak adlandırılan belirli zaman aralıklarında, kendini tekrarlar. Periyodik titreşimin en basit örneği "Harmonik Hareket"tir. Harmonik hareketin zamana göre değişimi sinüzoidal bir eğri ile tanımlanabilir.

Mekanik hareket büyüklükleri, yer değiştirme, hız ve ivmedir. Bu büyüklükler dinamik büyüklükler olarak da adlandırılırlar. Mekanik hareketin özelliklerine bağlı olarak doğrusal ve açısal olmak üzere iki ayrı gruba ayrılırlar. Doğrusal hareket, bir doğrusal eksen üzerinde yapılan, açısal hareket ise bir merkez noktasına göre dönme şeklinde yapılan salınım hareketidir.

Eğer titreşim tek bir eksen boyunca iletilen bir titreşim hareketi ise, zamana göre yer değiştirmesini belirten matematiksel ifade, aşağıdaki gibidir:

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t) \tag{328}$$

X_0 : referans noktadan olan maksimum yer değiştirme (genlik)

ω : titreşimin açısal frekansı ($2\pi f$),

f : frekans [Hz]

t : zaman [s]

Hareketli cismin hızı **v(t)**, yer değiştirmedeki değişimin zamana oranı olarak, aşağıda gösterilen ifade ile tanımlanabilir.

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \omega\, X_0 \cos(\omega t) = \omega\, x(t) \tag{329}$$

Hareketin ivmesi **a(t)**, hızdaki değişimin zamana oranıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -\omega^2\, X_0 \sin(\omega t) = -\omega^2\, x(t) \tag{330}$$

Titreşim ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan ölçüm büyüklüğü ivmedir. İvme büyüklüğünün birimi, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI)[2] temel büyüklüklerden metre (m) ve saniye (s) kullanılarak türetilen birim olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle temel SI birimlerinden farklı olarak CIPM tarafından beyan edilen bir tanıma sahip değildir. Doğrusal ivme birimi, SI birimler kitabında metre bölü saniye kare (m/s^2) olarak verilmektedir ve “a” sembolü ile gösterilmektedir. Açısal ivme ise radyan bölü metre kare (rad/s^2) olarak tanımlanmaktadır. SI temel birimleri cinsinden $1/s^2$ ile ifade edilmektedir.

Bazen titreşim ölçümlerinde ölçülen ivme ve hız büyüklükleri dB ölçeği kullanılarak da ifade edilmektedir.

İvme seviyesi, L_a;

$$L_a = 20 \log\left(\frac{a}{a_0}\right) \quad (331)$$

a : ölçülen ivme [m/s²]

a_0 : referans ivme, [1×10^{-6} m/s²]

Hız seviyesi, L_v:

$$L_v = 20 \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (332)$$

v : ölçülen hız [m/s]

v_0 : referans hız [1×10^{-9} m/s]

7.8.3.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi ve Dağıtımı

Titreşim alanında birincil standart, referans standart niteliğindeki ivme ölçerlerin (Şekil 464), kalibrasyonu ile elde edilir. Kalibrasyonda ivme ölçerin karmaşık (complex) hassasiyet değeri belirlenir. Titreşim dönüştürücüsünün hassasiyeti; elektriksel çıkışın, uygulanan mekanik girişe oranı olarak tanımlanır. Hassasiyet, ivme ölçerin çalışma frekans bölgesi içinde olan her bir frekansta bağımsız olarak ölçülebilir. Tüm dönüştürücüler için hassasiyet frekansa göre değişir. Hassasiyet, belirli bir frekans bölgesinde frekanstan bağımsız ise, o bölge için kalibrasyon faktörü olarak adlandırılır.



Şekil 464. Referans standart niteliğindeki ivme ölçerler

Hassasiyetin, büyüklük ve faz kayması olarak iki bileşeni vardır. İvme ölçer yük tipinde ise hassasiyetin büyüklüğü (S_{qa}), ivme ölçerin uygulanan ivmeye (a) karşı üretmiş olduğu elektrik yük miktarı (Q) olarak tanımlanır ve Eşitlik (333) ile hesaplanır.

$$S_{qa} = \frac{Q}{a} \qquad \left[\frac{pC}{(m/s^2)}\right] \tag{333}$$

İvme ölçer gerilim tipinde ise hassasiyetin büyüklüğü (S_{va}), ivme ölçerin uygulanan ivmeye (a) karşı üretmiş olduğu gerilim (V) olarak tanımlanır ve Eşitlik (334) ile hesaplanır.

$$S_{va} = \frac{V}{a} \qquad \left[\frac{mV}{(m/s^2)}\right] \tag{334}$$

İvme ölçerin hassasiyeti ya da kalibrasyon faktörü, temel birimleri oluşturan niceliklerin ölçülmesiyle doğrudan elde ediliyorsa bu kalibrasyon mutlak kalibrasyon olarak adlandırılır. Referans dönüştürücüleri karakterize etmek ya da minimum belirsizlik gerektiğinde mutlak yöntemler kullanılır.

Bir titreşim dönüştürücüsünün kalibrasyonunu yapmak için, dönüştürücüye kontrol edilebilir bir giriş uygulayan titreşim üretecinin titreşim seviyesi ve dönüştürücünün çıkışının ölçülmesi gereklidir. Dönüştürücü titreşim üreteci üzerine monte edilir. Mekanik bağlantı (vida, yapışkan vb.), dönüştürücünün frekans bölgesinde, titreşim üretecinin hareketini dönüştürücüye aktarmak için yeterince rijit olmalıdır.

Titreşim ölçümlerinde kullanılan ivme ölçerlerin kalibrasyonu ve testi için çeşitli yöntemler vardır. Kalibrasyon yöntemleri genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Belirli bir frekansta değeri bilinen titreşim seviyesi üreten kalibratör ile test,
- Karşılaştırma (comparison) kalibrasyon yöntemi,
- Yerçekimi kuvvetini kullanan yöntemler,
- Merkezkaç kuvvetini kullanan yöntemler,
- Karşılıklık (reciprocity) yöntemi,
- Yer değiştirme ölçme yöntemleri.

Titreşim kalibratörleri, çeşitli ortamlardaki titreşimlerin ölçülmesinde kullanılan titreşim ölçme sistemlerini kolay ve hızlı bir şekilde kontrol etmek amacıyla kullanılırlar. Bu kalibratörler, belirli bir frekansta değeri bilinen titreşim seviyesi üretirler. Kalibratör seviyesi, ölçme sisteminde doğru olarak ölçüldüğü zaman ölçüm sisteminin kontrolü tamamlanmış olur.

Karşılaştırma kalibrasyonu, sırt-sırta bağlanan ve aynı titreşim seviyesine maruz kalan referans dönüştürücü ve kalibre edilen dönüştürücünün çıkışlarının aynı anda ölçülmesini içerir. Bu kalibrasyon yöntemi genel amaçlı ivme ölçerlerin kalibrasyonu için kullanılmaktadır. Kalibrasyon düzeneğinde, lazer interferometre tekniği ile kalibre edilmiş olan birisi referans diğeri ise referans ivme ölçerin hassasiyetinin değişiminin kontrolü amacıyla iki adet standart referans ivme ölçer kullanılır.

Yerçekimi kuvveti ve merkezkaç kuvveti yöntemleri, yerçekimi ivmesini esas alan kalibrasyonlardır. Karşılıklık kalibrasyon yönteminde dönüştürücünün hassasiyeti; gerilim oranı, direnç, frekans ve kütle ölçümlerinden elde edilir. Karşılıklık yöntemi; yer değiştirme, hız, ivme ve sürücü bobin akımının, kuvvet ve sürücü bobin gerilimi ile doğru orantılı olarak değiştiği lineer sistemler için uygulanabilir. Kontrollü ortam şartları gerektirir ve genellikle çok zaman isteyen bir yöntemdir. Yer değiştirme ölçme yöntemi ise belli bir ivmelenmeye maruz kalan ivme ölçerin yer değiştirmesinin, lazer interferometre ile ölçülmesi esasına dayanır. Yer değiştirme yöntemi kendi arasında çeşitli alt yöntemlere ayrılmaktadır. Bunlar:

- Optik kafes yöntemi (optimal grating),
- Girişim saçaklarını sayma yöntemi,
- Bessel fonksiyonu yöntemi (sinyal sıfırlama tekniği),
- Sinüs yaklaşımı yöntemidir.

İvme ölçer kalibrasyonunda kullanılan yöntemler Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu ISO tarafından standart hale getirilmiştir. Güncel olan standartlar aşağıda verilmiştir.

ISO 16063: Titreşim ve Şok Dönüştürücülerinin Kalibrasyon Metotları [309].

Bölüm 1 : Temel Kavramlar,

Bölüm 11 : Lazer interferometre ile birincil titreşim kalibrasyonu,

Bölüm 12 : Karşılıklık (Reciprocity) metodu ile birincil titreşim kalibrasyonu,

Bölüm 13 : Lazer interferometre ile birincil şok kalibrasyonu,

Bölüm 15 : Lazer interferometre ile birincil açısal titreşim kalibrasyonu,

Titreşim ve şok dönüştürücülerin kalibrasyon ve testlerinde ayrıca ISO 5347: Titreşim ve Şok Dönüştürücülerinin Kalibrasyon Metotları başlıklı standart da kullanılmaktadır. Standardın alt bölüm bilgilerine www.iso.org sayfasından erişilmektedir.

Titreşim alanındaki birincil standart, ulusal metroloji enstitülerinde ISO 16063: Titreşim ve Şok Dönüştürücülerinin Kalibrasyon Metotları, Bölüm 11: Lazer interferometre ile birincil titreşim kalibrasyonu metodunun uygulanması ile elde edilir. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde de titreşim alanındaki doğrusal ivme birimi standardı bu standart kullanılarak oluşturulmuş ve yapılan çalışmalar yayınlanmıştır [310][311][312][313][314][315]. Standardın uygulanması sırasında nominal dalga boyu 632,8 nm olan frekans kararlı He-Ne lazer kullanılmaktadır.

ISO 16063-Bölüm 11'de tanımlanan yöntemlerin uygulanma frekans aralığı, 1 Hz - 10000 Hz'tir. Standartta bu frekans aralığı için üç ayrı metot tanımlanmaktadır.

Girişim Deseni (Fringe Counting), Sayma Metodu

Girişim deseni sayma metodunun üst frekans limiti, metodun belirsizlik değeri dikkate alındığında 1000 Hz olarak değerlendirilmektedir. Bu metodun temelini Michelson interferometresi oluşturmaktadır (Şekil 465). Lazer ışını, demet bölücü yardımıyla iki kola ayrılarak referans ayna (sabit ayna) ve titreşim kaynağının üzerine monte edilmiş ivme ölçerin yüzeyinden yansımaktadır. İki farklı yüzeyden yansıyan ışınlar, bir foto detektör üzerinde birleştirildiğinde, interferometredeki kollar arasındaki yol farkından dolayı interferometrik desen (girişim saçağı) oluşur. Foto detektör üzerindeki optik sinyalin şiddeti Eşitlik (335) ile verilir:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \times I_2} \times \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \times (I_2 - I_1)\right] \qquad (335)$$

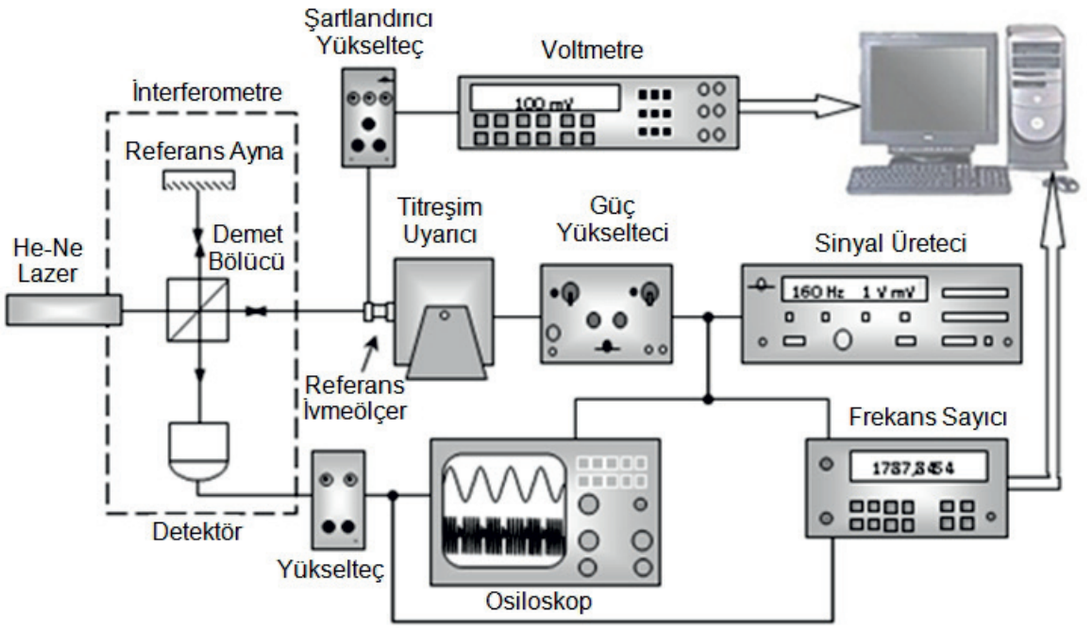
I_1 : sabit ayna yüzeyinden yansıyan ışın şiddeti

I_2 : ivme ölçer yüzeyinden yansıyan ışın şiddeti

$I_2 - I_1$: interferometredeki kollar arasındaki yol farkı

λ : lazerin dalga boyu

Eşitlik (335) iki bileşenden oluşmaktadır. "$I_1 + I_2$" terimi sabit bir değer olup, foto detektör çıkışında sabit gerilim (DC - ofset) oluşturur. Diğer terim ise, girişim saçağını oluşturan bileşen olup, foto detektörün çıkışında değişken gerilim olarak algılanacaktır. İnterferometrenin hareketli kolundaki $\lambda/2$'lik yer değiştirme, foto detektörün çıkışında elektriksel puls üretir. Bir titreşim periyodundaki puls sayısı veya girişim saçağı sayısının titreşim frekansına oranı R_f frekans sayıcı ile sayılır. Girişim saçağı sayısı yer değiştirme genliği ile doğru orantılıdır.



Şekil 465. Girişim deseni sayma metodunda kullanılan kalibrasyon düzeneği [313]

İnterferometrenin hareketli kolundaki yer değiştirme, eksensel hareket eden titreşim kaynağı tarafından sağlanır. Titreşim frekansı ve genliği, Sinyal Üretici ve Güç Yükselteci yardımlarıyla ayarlanabilir. Titreşim frekansının bir periyodunda, ivme ölçer yer değiştirme genliği olan d'nin dört katı kadar hareket eder. Bu bilgilerden yer değiştirme genliği ile R_f arasında

$$d = R_f \frac{\lambda}{8} \tag{336}$$

bağıntısı vardır. Doğrusal ivme ve yer değiştirme genlikleri arasındaki Eşitlik (330) kullanılırsa ivmenin genliği son olarak

$$a = 3{,}1227 \times 10^{-6}\ f^2\ R_f \qquad [m/s^2] \tag{337}$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte, f titreşim frekansıdır. Ayrıca dalga boyu $\lambda = 632{,}8$ nm alınmıştır. Böylece, Eşitlik (337) kullanıldığında, kalibrasyon sırasında sadece titreşim frekansı f ve oran frekansı R_f ölçüldüğünde, interferometrenin hareketli kolundaki ivme ölçerin maruz kaldığı ivme değeri mutlak olarak hesaplanabilir.

Belirli bir ivme seviyesine maruz kalan ivme ölçerin çıkışında oluşan yük Q, ivme ölçerin bağlı olduğu yük yükselteci (şartlandırıcı yükselteç) tarafından değişken gerilime çevrilir ve hassas voltmetre tarafından okunur.

Eşitlik (333) ve (337) kullanılarak ivme ölçerin yük hassasiyeti,

$$S_{qa} = \frac{V}{2{,}208 \times 10^{-6}\, f^2\, R_f\, k} \quad [\ pC/(m/s^2)\ ] \tag{338}$$

şeklinde hesaplanabilir. Eşitlik (338)'deki k parametresi, şartlandırıcı yükselteçin f frekansındaki kalibrasyon faktörüdür. Hassas voltmetre, ivme ölçerin ve bağlı olduğu şartlandırıcı yükseltecin çıkışındaki sinyalin etkin (RMS) değerini ölçtüğü için Eşitlik (337) ile elde edilen ivme genliği, √2 değerine bölünmelidir.

Minimum nokta (Bessel Fonksiyonu) Metodu

Referans standardı ivme ölçerlerin 800 Hz'in üzerindeki frekanslarda birincil kalibrasyonları minimum nokta (Bessel fonksiyonu) yöntemiyle gerçekleştirilir. Genel interferometre teorisine göre, interferometrenin bir kolu, $d = d_0 \sin(\omega t)$ formundaki yer değiştirmeye maruz kalırsa, foto detektör çıkışındaki elektriksel sinyalin ω frekansındaki bileşenin genliği $U_\omega = G \times I$ ifadesi ile gösterilebilir. Burada G, foto detektöre ait dönüştürme sabiti; I, ışık şiddetidir. Titreşimin genliği arttırıldığında, U_ω sinyali Bessel Fonksiyonu formunda bir değişim göstermektedir.

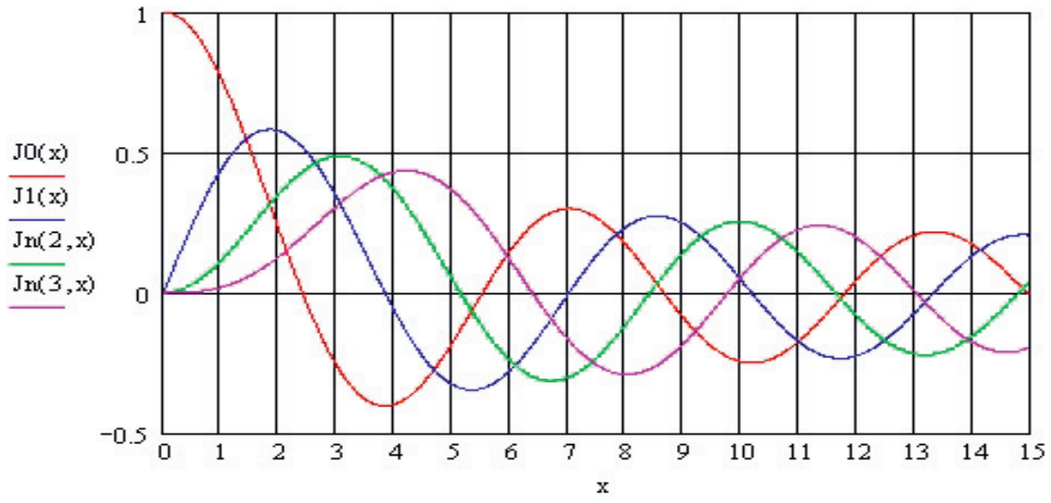
$$U_\omega = 2 \times G \times B \times J_1(x) \tag{339}$$

G : foto detektöre ait dönüştürme sabiti

B : ölçüm düzeneğine ait bir sabit

$J_1(x)$: birinci dereceden Bessel fonksiyonu

Bessel fonksiyonunun argümanı olan x parametresi, titreşimin dalga boyu cinsinden ifade edildiğinde $J_1(4\pi d_o/\lambda)$ elde edilir. Belli bir titreşim genliği d_o için teorik olarak U_ω= 0 şartı sağlanmaktadır. Birinci dereceli Bessel fonksiyonu $J_1(x)$=0 şartını sağlayan x değerleri çeşitli matematik kitaplarında tablolar halinde bulunmaktadır. Örnek olarak birinci dereceli Bessel fonksiyonunun (Şekil 466), ilk sıfır değeri x = 3,83170 ve ikinci sıfır değeri x = 7,01559 noktalarında oluşmaktadır.



Şekil 466. Bessel Fonksiyonlarının x parametresine göre değişimi

İvme ölçerlerin, Bessel fonksiyonu metodu ile kalibrasyonu, Şekil 465'de verilen düzeneğin basit bir modifikasyona uğramış hali ile gerçekleştirilebilir. Bu düzeneğe, foto detektör çıkışındaki sinyalin filtrelenmesi için frekans analizörü ya da filtre seti ile voltmetre eklenmelidir. Böylelikle herhangi bir frekanstaki titreşim genliği belirlenebilmektedir.

İnterferometrenin hareketli koluna uygulanan sinyalin, ivme ölçerin bağlı olduğu titreşim uyarıcıya uygulanan güç arttırılarak Bessel fonksiyonunun birinci sıfır noktasına ulaşıldığında, titreşimin genliği d_0 için

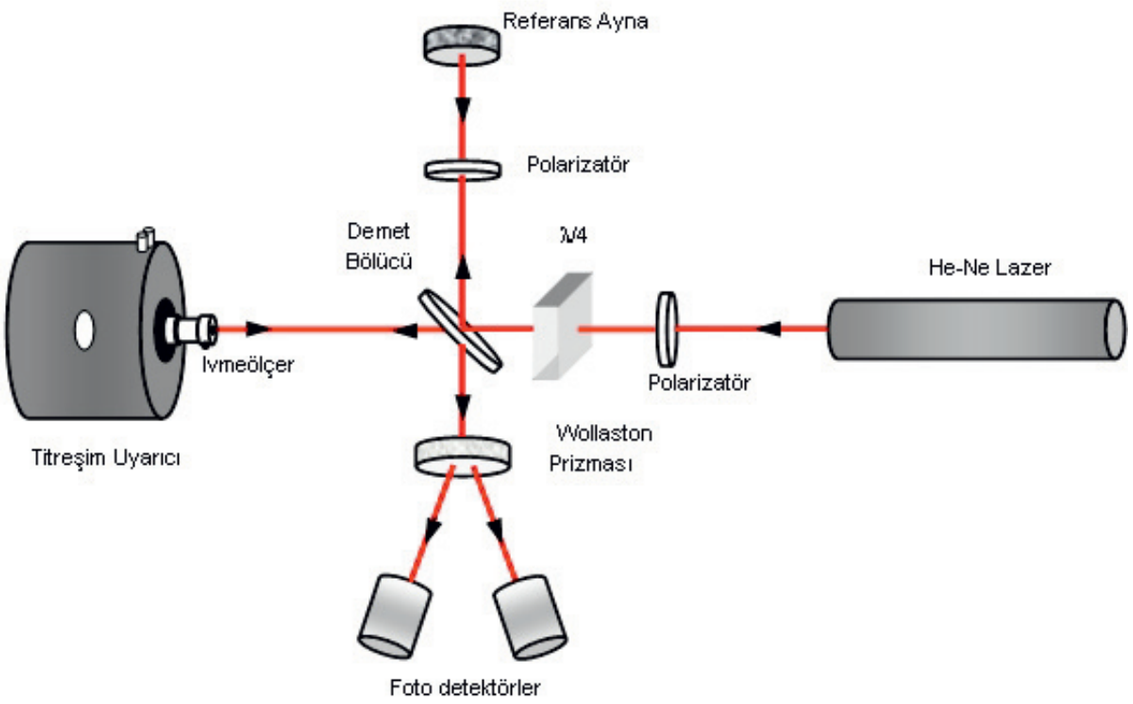
$$d_0 = 3{,}83170 \times \lambda/4\pi \qquad (340)$$

ifadesi elde edilir. Yer değiştirme değerinin elde edilmesi sonrasında Eşitlik (337) ve (338) kullanılarak ivme ölçerlerin hassasiyeti elde edilir.

Bessel fonksiyonu metodu ile ivme ölçer kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi, kolay olmasına rağmen iki önemli dezavantajı vardır. Bunlardan birisi, yönteminin frekans ölçeğinde üst sınırının 10000 Hz olduğu, diğeri ise yüksek frekanslarda kalibrasyon için yüksek titreşim seviyelere gereksinim duyulmasıdır. Bu yüzden yüksek frekans bölgelerinde dünyadaki farklı metroloji merkezleri tarafından birincil ivme ölçer kalibrasyonu için Sinüs Yaklaşımı Yöntemi gösterilebilir.

Sinüs Yaklaşımı (Sine approximation) Yöntemi

Referans standardı ivme ölçerlerin sinüs yaklaşımı yöntemi ile kalibrasyonlarında kullanılan interferometre düzeneği Şekil 467'de verilmiştir. Deneysel düzenekteki interferometre sistemi, aralarında 90° faz farkı olan çift (quadrature) çıkışlı (modified Michelson enterferometer-quadrature homodyne type) Michelson interferometresidir.



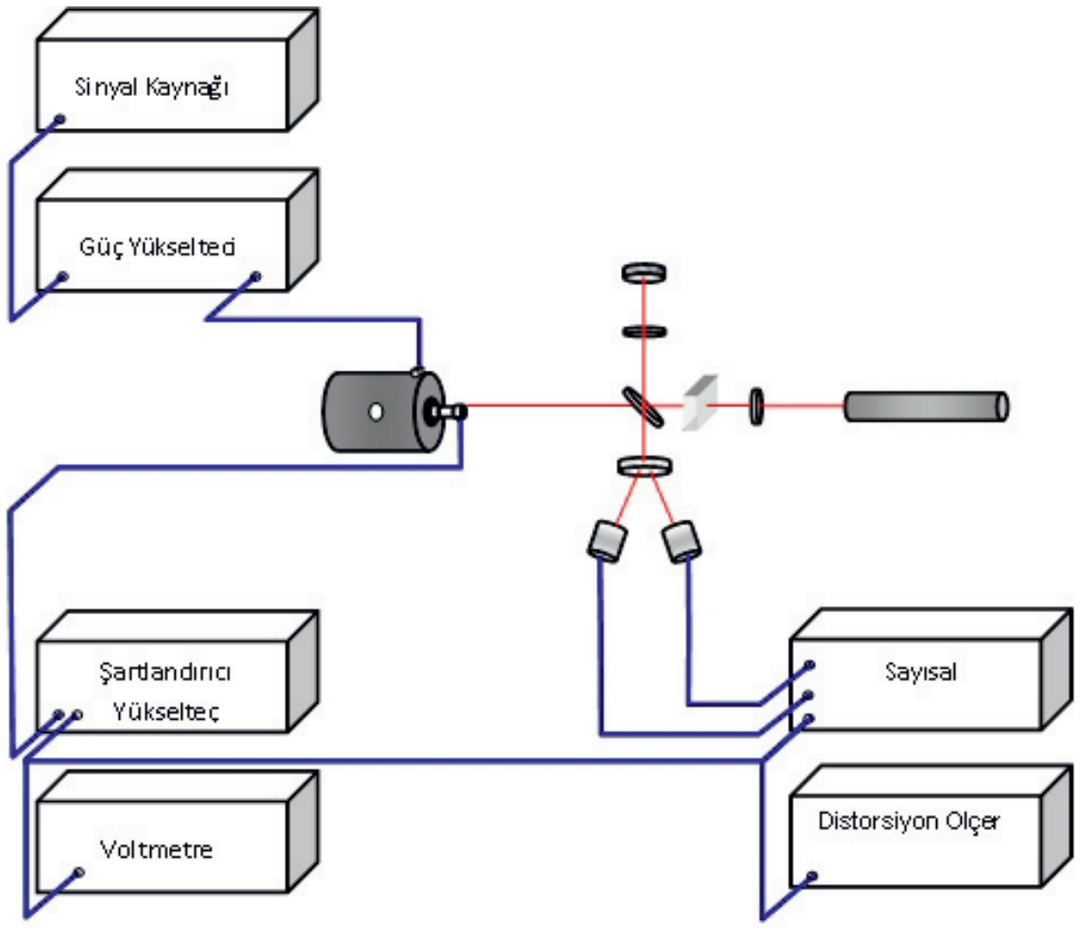
Şekil 467. Çift çıkışlı homodyne lazer interferometresi

İnterferometre düzeneği, polarizatörler, çeyrek dalga geciktirici optik plaka, demet bölücü, referans ayna ve Wollaston prizmasından oluşmaktadır. Wollaston prizması, yüzeyine gelen demetleri, aralarında 90° faz farkı olan iki ayrı sinyale ayırır. Çift çıkışlı homodyne interferometresinde, titreşim uyarıcı sinüzoidal olarak titreştirildiğine foto detektörlerden gelen çıkış sinyalleri;

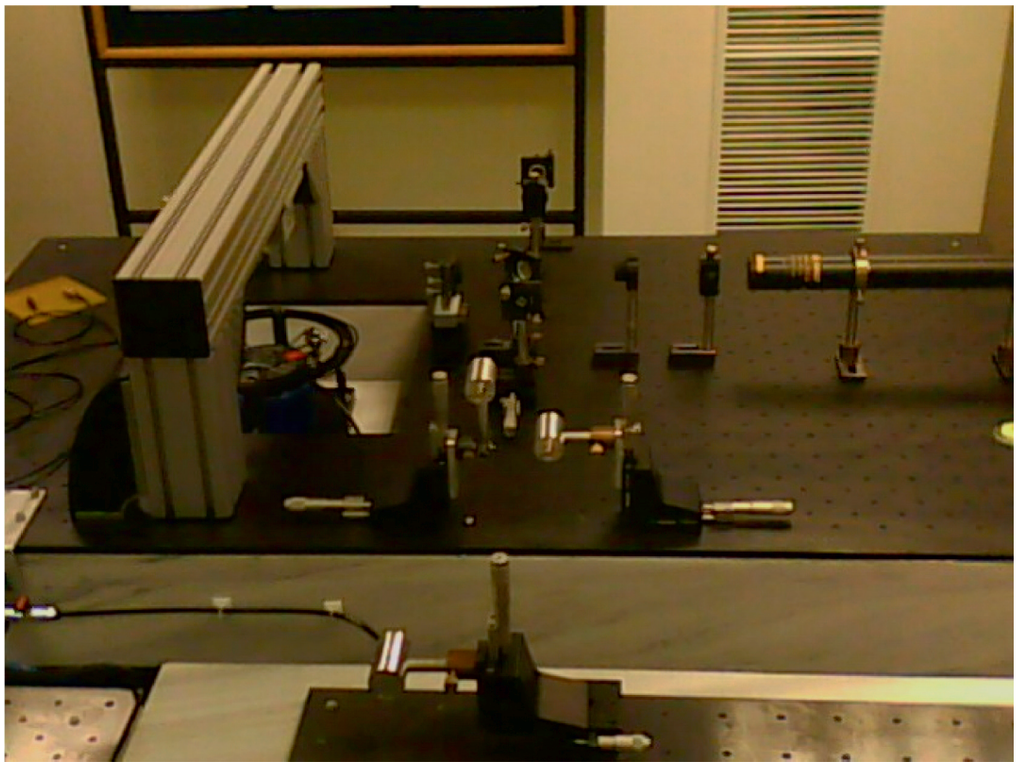
$$u_{1f}(t) = u_1 \cos(\varphi_{Mod}) \quad (341)$$

$$u_{2f}(t) = u_2 \sin(\varphi_{Mod}) \quad (342)$$

ile ifade edilebilir. Sinüs yaklaşımı yöntemi ölçüm düzeneği Şekil 468'de verilmiştir. Sinyal kaynağından alınan sinüs formundaki sinyal, güç yükselteci aracılığı ile titreşim uyarıcıya uygulanır. Titreşim uyarıcı, sinyal kaynağında ayarlı olan f frekansında sinüzoidal olarak titreşir. Titreşim hareketi ideal şartlarda tek eksende hareket eden piston hareketidir. Titreşim uyarıcının hareketli kafasına bağlı olan ivme ölçer f frekansında titreşir ve a genlikli ivmeye maruz kalır. İvmenin genliği, sinyal kaynağı veya güç yükselteci üzerindeki ayarlardan değiştirilebilir. İvme ölçerin çıkış sinyali, şartlandırıcı yükselteç üzerinden voltmetre ile doğrudan ölçülebilir. İvme ölçerin şartlandırıcı yükselteç üzerinden ölçülen çıkış sinyali volt birimi cinsinden olup değeri mV bölgesindedir. İvme ölçerin hassasiyeti pC/(m/s^2) biriminde elde edilmek isteniyorsa, kullanılan şartlandırıcı yükseltecin f frekansındaki mV/pC cinsinden hassasiyetinin bilinmesi gereklidir.



Şekil 468. Sinüs yaklaşımı yöntemi için ölçüm sistemi



Şekil 469. Sinüs yaklaşımı yöntemi için kullanılan ölçüm sistemi örneği

Ölçüm düzeneğindeki sayısal osiloskop, interferometre sisteminin ayarlanması sırasında gösterge elemanı olarak ve ayrıca foto detektör sinyallerinin örneklenmesi ve kaydedilmesi için kullanılmaktadır. İdeal şartlarda genlik çözünürlüğü 10 bit'ten daha iyi olan ve bilgisayar ara yüzü olan dalga formu kaydediciler kullanılmalıdır. Belirli bir ivme değeri için, düşük frekanslarda yer değiştirme genliği büyük olacağından dalga formu kaydedici için örnekleme oranı hızlı ve büyük depolama kapasitesine ihtiyaç olacaktır. Örneğin ivme ölçer, 1 Hz'te ve 0,1 m/s^2 ivme değerinde kalibre etmek istenilirse ve 512 kHz'ten büyük örnekleme frekansı kullanılırsa 4 Mbyte'tan daha fazla hafıza kapasitesine ihtiyaç olacaktır. Distorsiyon ölçer cihazı ise, ivme ölçerin çıkış sinyali üzerinde, titreşim frekansının harmoniklerinin etkilerini ölçmek için kullanılır.

İvme ölçerin maruz kaldığı ivmenin ve ivme ölçerin çıkış sinyali aşağıda verilen veri toplama ve veri işleme aşamalarında elde edilir.

Foto detektörlerden gelen sinyaller ile ivme ölçer çıkış sinyali eşzamanlı olarak örneklenmelidirler. Foto detektörden $t_0 < t < (t_0 + T_{ölçüm})$ zaman aralığında ölçülen $\{u_{1f}(t_i)\}$ ve $\{u_{2f}(t_i)\}$ serilerinin örnekleme aralığı $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ sabit olmalıdır. İvme ölçer çıkış değerleri için örneklenen seri $\{u_a(t_i)\}$'dir.

İvme ölçerin hassasiyetinin büyüklüğü ve faz kayma değeri, aşağıda verilen işlemler sonucunda bulunur. Foto detektörlerden gelen interferometre çıkış değerleri $\{u_{1f}(t_i)\}$ ve $\{u_{2f}(t_i)\}$ kullanılarak modülasyon faz değerleri serisi

$$\varphi_{Mod}(t_i) = \arctan\left(\frac{u_1 \times f(t_i)}{u_2 \times f(t_i)}\right) + n\pi \qquad (343)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada; n tamsayı olmak üzere n = 0, 1, 2, ..., olarak seçilir. Modülasyon faz değerlerine $n\pi$ değerinin eklenmesi ile modülasyon faz serisindeki $\{\varphi_{Mod}(t_i)\}$ süreksizlik

ortadan kaldırılır. Bu işlem faz düzeltmesi (phase unwrapping) olarak adlandırılır. n sayısının hesaplanması ile ilgili algoritmalara literatürden erişilebilir.

Yer değiştirme serisi $s(t_i)$, faz düzeltmesi uygulanmış (süreksizlikleri kaldırılmış) modülasyon faz değerleri serisinden Eşitlik (344) yardımıyla hesaplanabilir.

$$s(t_i) = \frac{\lambda}{4\pi}\varphi_{Mod}(t_i) \tag{344}$$

Elde edilen modülasyon faz serisi, ivme ölçerin maruz kaldığı ivmenin hesaplanmasında kullanılabilecek bir sinyal formunu ifade etmektedir. İvmenin hesaplanması için doğrudan yeterli olmamaktadır. Modülasyon faz değerleri serisinin analitik formu aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir.

$$\varphi_{Mod}(t_i) = A\cos(\omega t_i) - B\sin(\omega t_i) + C \tag{345}$$

i : 0, 1, ... , N

A : $\varphi_M \cos\varphi_s$

B : $\varphi_M \sin\varphi_s$

C : katsayı

ω : titreşim açısal frekansı ($\omega=2\pi f$)

φ_s : yer değiştirme başlangıç faz açısı

φ_M : modülasyon faz genliği

Ölçümlerden elde edilen modülasyon faz serisi ve modülasyon faz serisini temsil eden sinyalin analitik ifadesi kullanılarak, modülasyon faz değerleri en küçük kareler toplama yöntemi (least-squares sum method) kullanılarak belirlenir. Çözümlerde ölçüm periyodu süresince örneklenmiş N+1 adet veri kullanılmaktadır.

Modülasyon faz genliği φ_M ve başlangıç faz açısı φ_s sinüs yaklaşım metodu kullanılarak elde edilen A ve B parametrelerinden hesaplanır.

$$\varphi_M = \sqrt{A^2 + B^2} \tag{346}$$

$$\varphi_s = \arctan\frac{B}{A} \tag{347}$$

İvme ölçerin maruz kaldığı ivmenin genliği â ve ivme başlangıç faz açısı φ_a, modülasyon faz genliği φ_M ve başlangıç faz açısı φ_s değerleri kullanılarak aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanır.

$$\hat{a} = \pi\lambda f^2\varphi_M \tag{348}$$

$$\varphi_a = \varphi_s + \pi \tag{349}$$

İvme ölçer çıkış sinyali, ivme değerinin elde edilmesi için yukarıda verilen sinüs yaklaşım tekniği kullanılarak elde edilebilir. İvme ölçerin çıkış sinyali doğrudan voltmetre kullanarak ölçülebilir ancak bu kez ivme ölçer hassasiyetine ait faz bilgisi elde edilemez. İvme ölçer çıkış sinyali analitik olarak Eşitlik (350) ile ifade edilebilir.

$$u(t_i) = A_u\cos(\omega t_i) - B_u\sin(\omega t_i) + C_u \tag{350}$$

A_u : $\hat{u}\cos\varphi_u$

B_u : $\hat{u}\sin\varphi_u$

C_u : katsayı

$\hat{u}$: ivme ölçer çıkış sinyali genliği

φ_u : ivme ölçer çıkış sinyali başlangıç faz açısı

İvme ölçer çıkış sinyal genliği $\hat{u}$ ve başlangıç faz açısı φ_u, sinüs yaklaşım metodu kullanılarak elde edilen A_u ve B_u parametrelerinden hesaplanır.

$$\hat{u} = \sqrt{A_u^{\,2} + B_u^{\,2}} \tag{351}$$

$$\varphi_u = \arctan\frac{B_u}{A_u} \tag{352}$$

İvme ölçerin kompleks hassasiyetinin genliği S_{qa} ve faz kayması $\Delta\varphi$, sinüs yaklaşım metodu kullanılarak elde edilen ivme genliği $\hat{a}$, ivme ölçer çıkış sinyal genliği $\hat{u}$, başlangıç faz açıları φ_a ve φ_u kullanılarak aşağıdaki verilen ifadeler kullanılarak hesaplanabilir.

$$S_{qq} = \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \tag{353}$$

$$\Delta\varphi = (\varphi_u - \varphi_a) = (\varphi_u - \varphi_s - \pi) \tag{354}$$

7.8.3.2 Ölçüm Standartları ve Yöntemleri

Doğrusal ivme birimi birincil seviyede oluşturulduktan sonra alt seviyelere aktarımı çeşitli cihazların kalibrasyonları ile yapılmaktadır. Bunlar;

- Çalışma Standardı İvme Ölçerler,
- Titreşim Uyarıcılar,
- Empedans Başlığı,
- Yapay Mastoid

Birimin alt seviyeye aktarımı amacıyla kullanılan kalibrasyon yöntemlerinin büyük çoğunluğu uluslararası kuruluşlar tarafından hazırlanan standartlarda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu standartlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

ISO 16063 : Titreşim ve Şok Dönüştürücülerinin Kalibrasyon Metotları

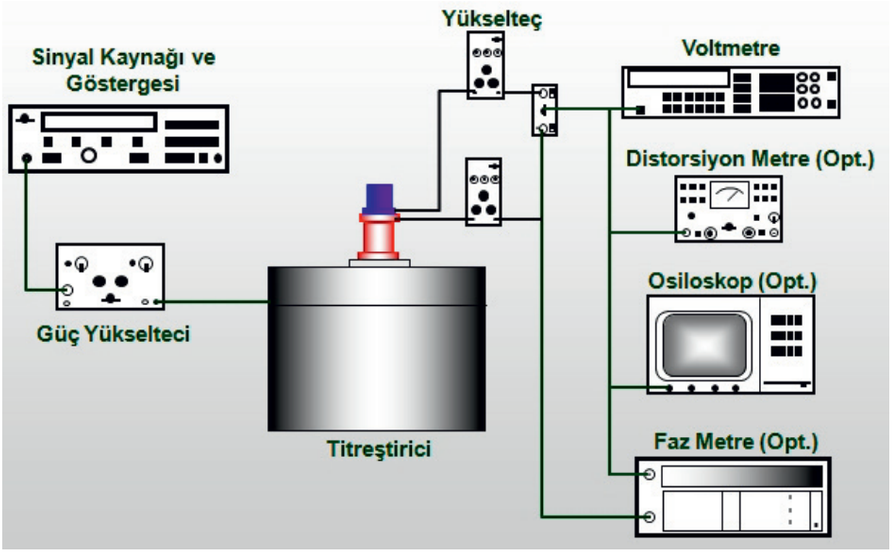
Bölüm 1 : Temel Kavramlar,

Bölüm 21 : Bir referans dönüştürücü ile karşılaştırma kalibrasyonu,

Bölüm 22 : Bir referans dönüştürücü ile karşılaştırmalı şok kalibrasyonu,

ISO 8041 : İnsan Vücudunun Titreşime Tepkisi – Ölçüm Cihazları

Çalışma standardı ivme ölçerlerin kalibrasyonları, referans standart niteliğindeki ivme ölçerlerle karşılaştırma yöntemiyle yapılmaktadır. Kalibrasyonlar için Şekil 470'de şematik olarak gösterilmiş olan düzenek kullanılmaktadır.



Şekil 470. İvme ölçerlerin karşılaştırma kalibrasyonu düzeneği

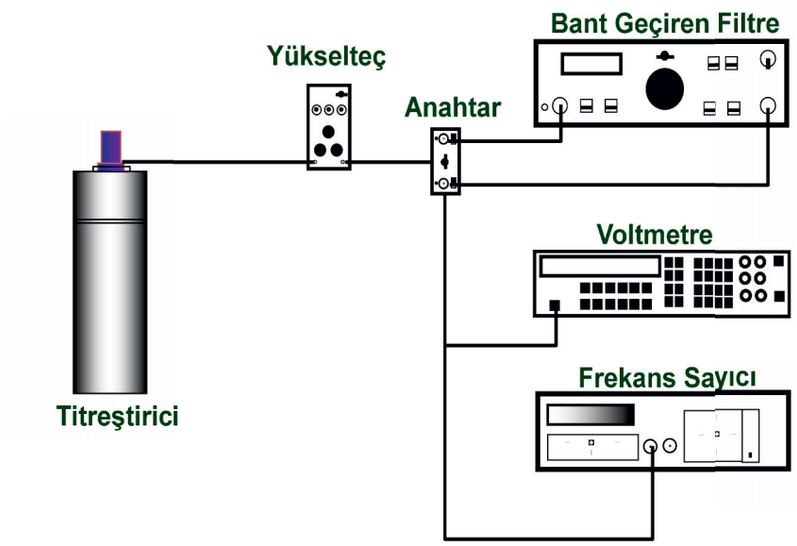
Referans ivme ölçer ile hassasiyeti belirlenecek olan ivme ölçer sırt-sırtta bağlanarak aynı ivme seviyesine maruz kalırlar. Her iki ivme ölçerin ivme değeri aynı olduğundan ivme ölçerlerin çıkışları oranı hassasiyetleri oranına eşittir.

$$\frac{V_{ref}}{V_x} = \frac{S_{ref}}{S_x} \tag{355}$$

V_{ref}, V_x : Referans ve kalibre edilecek ivme ölçerin gerilimleri

S_{ref}, S_x : Referans ve kalibre edilecek olan ivme ölçerin hassasiyet değeri

Sahada yapılan titreşim ölçümlerinde ölçüm sistemi ölçüm öncesi ve sonrası portatif titreşim uyarıcılar kullanılarak kontrol edilmelidir. Titreşim uyarıcı nominal olarak 159,2 Hz frekansında 10,0 m/s²'lik ivme üreten bir titreşim kaynağıdır. Titreşim uyarıcıların nominal özellikleri, ISO 8041 standardında tanımlanmıştır [316]. Önemli parametreleri, üretilen ivme değeri, ivmenin toplam Harmonik bozulması ve titreşimin frekansıdır. Titreşim uyarıcısının kalibrasyonunu gerçekleştirmek için Şekil 471'de gösterilen düzenek kullanılır.



Şekil 471. Titreşim uyarıcı kalibrasyonu düzeneği

Titreşim uyarıcısının ürettiği ivme seviyesi, titreşen yüzeye monte edilmiş ivme ölçer ve şartlandırıcı (yük veya gerilim) yükselteci tarafından üretilen gerilimin, ivme ölçerin hassasiyetinin oranına eşittir. Titreşim uyarıcının ürettiği ivme:

$$a = \frac{V}{S_{qa} \times k} \qquad (356)$$

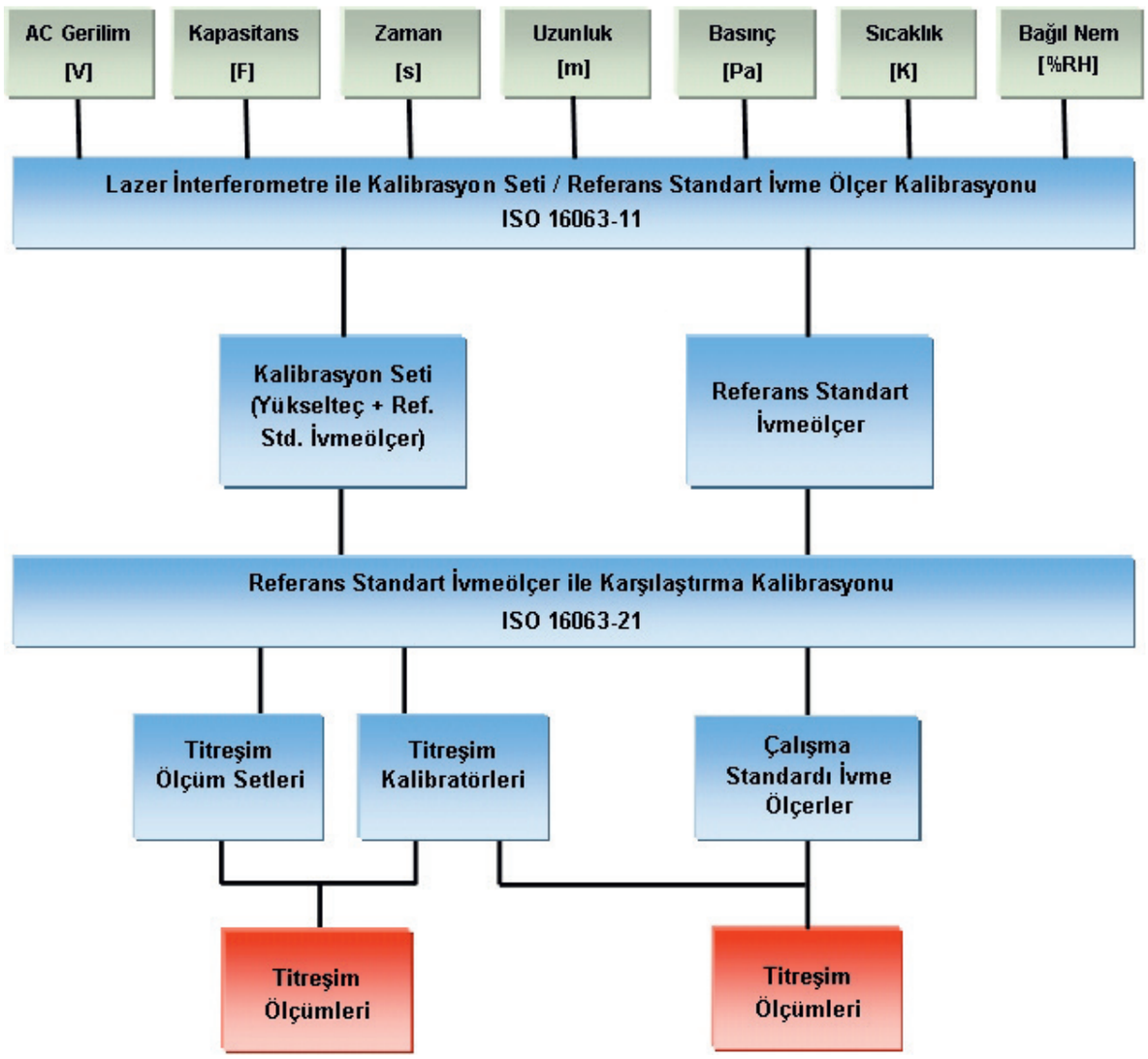
değerlerinden hesaplanabilir.

V : İvme ölçer - yük yükseltecinin çıkış gerilimi

S_{qa} : İvme ölçerin yük hassasiyeti

k : Dönüştürme katsayısı

Titreşim ölçümleri, kesintisiz bir hat ile ulusal standartlara bağlı olmalıdır. Bu işlem, ölçüm sisteminin kalibrasyonu sonucunda oluşturulur. Böylelikle yapılan ölçümlerin doğruluğu ve kalitesi sağlanmış olur.



Şekil 472. Titreşim ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri

7.9. KİMYASAL METROLOJİ

7.9.1 MADDE MIKTARI

7.9.1.1 SI Biriminin Tanımı, Elde Edilmesi

19. yüzyılda dünyanın önde gelen ülkeleri kullanmış oldukları ölçüm birimlerinde belli bir standardizasyona gitmişler ve bu bağlamda öncelikle uzunluk birimi olan metrenin adını verdikleri Metre Konvansiyonu'nu 1875 yılında imzalamışlardır. Osmanlı Devleti'nin de imza koyduğu bu anlaşma dünya genelinde aynı metrik sisteme geçişin ilk resmi adımı sayılmaktadır. Böylece, dünya ülkeleri Uluslararası Birimler Sistemi'nin (SI) temellerini atmışlardır. Yıllar içinde bütün SI birimlerinin oluşturulması ve türetilmesi çalışmaları büyük ölçüde tamamlanmıştır. Kimyasal metroloji alanında madde miktarı ile ilgili çalışmalar 1800'lü yıllarda başlamış ve günümüzde de halen devam etmektedir. İlk olarak 1811 yılında İtalyan bilim insanı Amadeo Avogadro (1776-1856), aynı sıcaklık ve basınç altında belirli bir hacimde birbirinden farklı gazların atom veya molekül sayılarının eşit olduğunu tespit etmiştir. Aynı alanda yapılan diğer bir çalışmada ise 1865 yılında Avusturya'da lise öğretmeni olan Josef Loschmidt (1821-1895) de 1 cm^3 hacimde yer alan gaz moleküllerinin sayısını hesaplamıştır. Fransız Fizikçi M. Jean Perrin, 1909 yılında yayınlanan "Brownian Movement and Molecular Reality" yayınında Amadeo Avogadro'nun yaklaşık yüz yıl önce yaptığı tespitin önemini vurgulayarak "N" sabitinin "Avogadro Sabiti" olarak kullanımının uygun olacağını önermiş ve bu tarihten sonra da aynı şekilde kullanılmıştır [317].

20. yüzyılın ortalarında kimyacılar, maddenin değerliğine bağlı olan, kütle dışında bir ölçü birimine ihtiyaç duymuşlar ve kimyasal ölçümlerde SI birimi olarak *mol* birimini kullanmaya başlamışlardır. Diğer bütün birimlerde olduğu gibi, *mol* kavramının da belli bir metroloji sistematiği içinde oluşturulması gerekliliği doğmuştur. Bu bağlamda, *mol* kavramının belli temeller üzerine oturtulması ve açıklanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Konu ile ilgili kuruluşların (IUPAP, IUPAC ve ISO) önerileri üzerine Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) mol'ün tanımını 1967 yılında yapmış, 1969 yılında onaylamış ve bu karar 1971 yılında 14. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda duyurulmuştur [2][318]. Bu tanımlamaya göre **mol**:

- Karbon-12 izotopunun (diğer izotoplarından arındırılmış) 12 gramının içerdiği atom sayısı kadar temel varlık içeren bir sistemin madde miktarıdır.
- SI ölçüm birimi olarak kullanıldığında, sistemdeki temel varlıklar içeriğine göre, atom, molekül, iyon, elektron, diğer parçacıklar veya bu parçacıkların belirli gruplarını ifade etmektedir.
- Uluslararası Birimler Sistemi'nin (SI) temel ünitesidir.

Karbon 12'nin atomik ağırlığı 12 gram/mol olarak belirlenmiş ve Periyodik Tablo'daki diğer tüm elementlerin atomik ağırlıkları Karbon 12'ye olan kütle oranına göre hesaplanmıştır. Günümüzde kullanılan mol kavramı karbon 12 izotopuna göre tanımlanmış olan bir kavram olup, kimyacılar da diğer alanlarda olduğu gibi mol'ü de belirli bir standart sabitine eşleştirmenin yollarını aramakta ve mol kavramını yeniden tanımlamaya çalışmaktadırlar.

1. Saf bir örneğin madde miktarı, n, örneğin kütlesinin (m = g) moleküler ağırlığına (M = g / mol) bölünmesiyle bulunur.

$$n = \frac{m}{M} \tag{357}$$

2. Saf gaz halinde bulunan örneklerin madde miktarı ise Eşitlik (358) ile hesaplanır.

$$p \times V = n \times R \times T \tag{358}$$

$$n = \frac{P \times V}{R \times T} \quad (359)$$

P : Basınç

V : Hacim

T : Sıcaklık

R : Gaz sabiti (8,314 J mol^{-1} K)

İdeal gaz olarak tanımlanan gaz standart koşullar olarak adlandırılan 1 atmosfer basınçta ve 273 Kelvin derecesinde 22,4 litrelik bir hacmi doldurmaktadır.

Avogadro Sabitinin Hesaplanması:

Ölçüm tekniklerindeki gelişmeler sonucunda yapılan son ölçümlere göre, Avogadro Sabiti'nin değeri, N_A= 6,02214179 10^{23} mol^{-1} olarak hesaplanmıştır [319]. Mol'ün kavramından yola çıkılarak hazırlanan periyodik tablodaki elementlerin atom ağırlıkları kullanılarak madde miktarı hesaplanabilmektedir.

Mol tanımında da belirtildiği gibi Avogadro sayısının değeri doğrudan madde miktarına karşılık gelmektedir. Aslında nasıl tanımlanırsa tanımlansın, mol'ün elde edilmesinde farklı birincil yöntemler kullanılmaktadır: Bu yöntemlerin ilkinde kolumetrik yöntemde Faraday sabitinin ölçülmesinden faydalanılmakta ve kimyasal elektrolizde elektrottan ayrılan madde miktarı sistemden geçen yükle orantılı olduğundan ve bu eşitlikten Avogadro Sabiti hesaplanabilmektedir;

$$n = \frac{z \times Q}{F} = \frac{z \times t \times I}{F} \quad (360)$$

I : Elektrik akımı

Q : Yük

F : Faraday sabiti

Diğer bir yöntemde ise günümüz teknolojisiyle yüksek saflıkta silikon kristaller kullanılmaktadır. Avogadro sabitinin daha düşük belirsizlikle yeniden hesaplanması için farklı araştırma enstitülerinden bilim insanlarının katkıları ile BIPM çatısı altında Avogadro Sabiti Çalışma Grubu kurulmuştur. Bu kristallerin ölçümleri XRCD (X-ray Crystal Density) cihazından yararlanılarak yapılmakta ve Avogadro sayısı molar hacimin, V_m atomik hacme, V_{atom} bölünmesiyle hesaplanabilmektedir.

$$N_A = \frac{V_m}{V_{atom}} \quad (361)$$

V_{atom}= bir ünite silikon hücresinde bulunan atom sayısı = $\frac{V_{hücre}}{n}$

Kimyasal metroloji alanında, son yıllarda, Avogadro Sabiti'nin değeri konusunda araştırmalara hız verilmiş ve farklı model arayışlarına girilmiştir. Doğada saf olarak bulunan silikondan yapılmış bir kürenin belli bir hacimdeki kütlesini dikkate alarak yeni bir kütle üretilmesi ve bu kütleden yararlanılarak Avogadro Sabiti'nin 100 kat daha düşük belirsizlikle hesaplanması çalışmaları halen devam etmektedir. Bu yeni tanımın, özünde, eski tanımdan farklı olarak çok büyük yenilik getirmediğini ifade edenler ile yeni tanıma göre atomların molekül kütlelerinden kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin son derece küçük boyuta ineceğini düşünenler arasında süren bilimsel tartışmalar devam etmekte olup yakın gelecekte bu konuda nihai karar verilecektir. Bugün için yeni tanımın bir adım önde olduğu rahatlıkla söylenebilir.

7.9.2 KIMYASAL ÖLÇÜMLERDE KALITE

7.9.2.1 Kimyasal Ölçümlerde Kalitenin Sağlanması

Ölçümler günlük hayatta her vatandaşı etkiler. Geçerli, doğru ve güvenilir fiziksel, kimyasal veya biyolojik ölçümler modern toplulukların işleyişinin bir gereğidir. Bu nedenle gelişmiş toplumlar gayri safi milli hasılalarının % 6'sına kadar olan kısmını ölçümlerde ve ölçümlerle ilgili işlemlere harcarlar [320].

Kimyasal ölçümler üretim kontrolünde, ürün kalitesini belirlemede, ticari amaçla ürün sınıflandırmada, uluslararası ticarette teknik engellerin aşılmasında, çevre kontrol amacıyla, sağlık ve tıp alanında hastalıkların teşhis ve tedavisinde, adli tıpta suçlu teşhisinde yapılmaktadır. Yapılan kimyasal ölçüm veya analiz sonuçlarına dayanarak kararlar verilmektedir. Kararlar analitik sonuçlara dayalı olduğundan sonucun istenen amaca uygun nitelikte olup olmadığı gibi sonuçların kalitesi ile ilgili bilgileye sahip olmak önemlidir. Bu nedenle, yapılan kimyasal ölçüm sonucunun doğruluğu, güvenilirliği ve karşılaştırılabilirliği büyük önem taşımaktadır. Tüm bu alanlarda sadece doğru cevabın elde edilmesi önemli değil, aynı zamanda sonuçların tüm örneği temsil etmesi ve sonuçların güvenirliği, izlenebilirliği ve tüm laboratuvarlar tarafından karşılıklı kabul edilebilirliği de oldukça önemlidir.

Farklı laboratuvar sonuçları arasında büyük farklar olması bu sonuçlara dayanarak karar vermeyi zorlaştırmakta ve çoğu zaman taraflar arasında anlaşmazlıklara neden olmaktadır. Bu nedenle, kimyasal ölçümlerin belirlenen amaca uygun kalitede olması gerekir. Kalite kriterleri olarak doğruluk ve tekrarlanabilirlik en temel parametrelerdir. Günümüz rekabetçi ortamında üretilen her türlü ürün ve/veya hizmetin belirli bir kalitede olması, rekabet açısından ise rakiplerinden daha kaliteli olması gereği herkesçe kabul edilen bir gerçektir. Kaliteli ürün veya hizmet, ancak belli bir kalite sisteminin uygulanması ile mümkündür. Ürün ve/veya hizmetin kalitesinin belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde test ve ölçme en önemli araçtır.

Diğer yandan uluslararası ilişkilerin ve ticaretin artması nedeniyle, kimyasal ölçümlerin tekrarını ortadan kaldırmak için ölçüm sonuçlarının biri birleriyle karşılaştırılabilir olması gerekmektedir. Karşılaştırılabilir sonuç ise ancak ortak bir referansa göre ölçüm yapılarak sağlanabilir.

Bir analistin yanlış sonuçlar elde etmesinin ve müşterinin bu sonuca dayanarak hatalı bir karar vermesinin sosyal ve ekonomik etkileri çok büyük olabilir. Adli tıpta, yanlış mahkumiyetlere veya suçluların cezalandırılmamasına, ticarette standart dışı malların piyasaya sürülmesine ve müşteri kaybına neden olması nedeniyle çok yüksek maliyetlere, çevre izlenmesinde tehlikelerin ortaya çıkmamasına veya gerçek olmayan tehlikelerin belirlenmesine, ilaçlarda aktif etken madde miktarının hatalı olması hastalarda çok kötü sonuçlara neden olabilir.

Öte yandan, kimyasal analiz maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle, ölçümlerin tekrarını ortadan kaldırmak için kimyasal ölçüm sonuçlarının birbirleriyle karşılaştırılabilir olmasını gerektirmektedir. Tüm bu sektörler için "bir kez ölçüm ve her yerde geçerli sonuç" oldukça önemlidir [321][322].

Kimyasal ölçümler, ölçüm yöntemine, analiz edilen matrikse ve matriksin bileşimine, analiz edilecek bileşene, örnek alma ve hazırlama prosedürüne, kullanılan cihaza, kullanılan kimyasal maddeler, referans malzemelere, laboratuvar koşulları ve analizi yapan analiste bağlıdır. Tüm bu değişkenlerin analiz sonucuna ve kalitesine etkisinin incelenmesi ve değerlendirilmesi istenen kalitede analiz için bir zorunluluktur. Ölçüm parametrelerinin çokluğu, ölçüm işleminin standartlaştırılmasını çoğu zaman güçleştirmektedir.

Kimyasal Ölçümlerin Kalitesini Etkileyen Parametreler

Ölçüm Metodu:

Kimyasal ölçümlerde, ölçüm metodu önemli ve belirleyici bir parametredir. Ölçülen bileşenin cinsine, derişimine ve matrikse bağlı olarak farklı metotlar uygulanabilir. Aynı bileşeni analiz etmek için birden fazla ölçüm metodu bulunmaktadır. Ölçüm amacına uygun kalitede ölçüm için doğru metot seçilmesi çok önemlidir. Belli bir amaçla analiz metodu seçilirken göz önünde bulundurulacak parametreler;

- metot ulusal ve/veya uluslararası kabul görmüş bir metot olmalı,
- metodun ölçüm aralığı, doğruluğu ve tekrarlanabilirliği amaca uygun olmalı,
- metodun uygulanması kolay olmalı,
- metodun analiz süresi kısa olmalı,
- analiz maliyeti az olmalı,
- analiz sonuçları, ortam şartlarındaki değişiklerden fazla etkilenmemelidir.

Bu kriterlere göre ölçüm metodu belirlendikten sonra metot laboratuvarda uygulanmadan önce geçerli kılınmalıdır. Pratikte, rutin ölçümler için analitik metodun amaca uygunluğu genellikle metot geçerli kılma çalışmaları sırasında değerlendirilir.

Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar:

Kimyasal ölçümlerde kullanılacak cihazların teknik özellikleri ve performansı en az metodun gerektirdiği performansı sağlayacak özelliklerde olmalıdır. Ayrıca cihazın kullanım maliyeti, kullanım kolaylığı, cihaz bakım ve kalibrasyon periyotları göz önünde bulunmalıdır.

Kimyasal ve Referans Malzemeler:

Kimyasal ölçümlerde kullanılan tüm kimyasalların ve sertifikalı referans malzemelerin teknik özellikleri tanımlanmalı ve istenen özellikte olduğu kanıtlandıktan sonra kullanılmalıdır. Kalibrasyon amacıyla kullanılacak referans malzemeler ve kalibrasyon standartları mutlaka izlenebilir olmalıdır. Örnek hazırlama, kimyasal reaksiyon ve işlemlerde kullanılan kimyasal maddeler metotta istenen kalitede ve saflıkta olmalıdır.

Analist:

Bir kimyasal ölçüm veya analizin metotta belirtilen prosedüre göre doğru şekilde yapılması, ölçümü veya analizi yapan kişinin bilgi ve deneyimine bağlıdır. Bu nedenle analizi yapan kişi metot hakkında yeterli temel bilgiye sahip olmalı ve metodun prensibini doğru olarak anlamış olmalıdır. Analist, metodun gerektirdiği performansı elde edebildiği kanıtladıktan sonra metotla analiz yapmalıdır.

Yüksek kaliteli ölçümler nitelikli uzman gerektirir. İyi eğitim almış ve konu hakkında bilgi sahibi herhangi bir kişi uzman olabilir. Ancak uzmanların düzenli aralıklarla bilgilerini güncellemek için tekrar eğitimlerine ihtiyaçları vardır.

Laboratuvar Koşulları:

Kimyasal ölçüm ve analiz sonuçlarına etki eden ortam koşulları ve bunların etkisi metot geçerli kılınması sırasında ölçülerek belirlenmelidir. Ortam koşullarının belirlenen değerler arasında olması sağlanmalı ve kontrol edilmelidir.

7.9.2.2 Metodun Geçerli Kılınması

Kimyasal analizler günlük hayatın birçok alanında uygulanır ve sonuçları çeşitli yollardan hayat kalitemizin artmasına katkı sağlar. Günlük hayata doğrudan yansıyan tıbbi analizlerin yanı sıra, yasal gerekliliklerin yerine getirilmesi, adli olayların aydınlatılması, çevrenin korunması, gıda analizleri ve bunun gibi birçok alanda yoğun iş akışlarına paralel analizler yapılır ve sonuçları raporlanır. Söz konusu analiz sonuçları uluslararası düzeyde ticari ve bilimsel etkinlikler çerçevesinde kullanılır. Kimyasal analiz sonuçlarının doğruluğu, ticaret, sağlık, hukuk ve gıda gibi alanlarda karar mekanizmalarının doğru işlemesi, test ve belgelendirme konusunun teknik engel haline gelmesinin önüne geçilmesi, hizmetlerin farklı ülkelerde farklı niteliklerde yürütülmesinin engellenmesi, maliyetin düşürülmesi ve en sonunda müşteri beklentisinin karşılanması açısından büyük önem taşır.

Kimyasal ölçümlerin kabul görmesi, diğer bir deyişle kalitesinin sağlanması için çeşitli düzenlemeler bulunmaktadır. 1999 yılında ulusal metroloji enstitüleri tarafından imzalanan Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi gereğince, bir ölçüm sonuncunun bir kez ölçüldüğünde her yerde geçerli olması gerekliliği üzerinde fikir birliğine varılmıştır. Türkiye adına TÜBİTAK UME 14 Ekim 1999'da bu anlaşmaya imza atmıştır. Tüm bu gerekçeler ölçüm sonucunun kalitesinin sağlanması için itici güç olmaktadır. Ölçüm sonuçlarının kalitesinin sağlanması için kimya alanında metodun geçerli kılınması, ölçüm belirsizliğinin hesaplanması ve izlenebilirliğin sağlanması üç temel araçtır. Kalitenin sürekliliği ise kalite kontrol uygulamaları, ulusal ve uluslararası düzeyde katılım sağlanan laboratuvarlar arası karşılaştırmalar ile sağlanır.

Bu bölümde metodun geçerli kılınması ele alınacak, geçerli kılma araçları tanıtılacaktır. Metodun geçerli kılınması ve metot geçerli kılma göstergelerinin yaygın olarak kullanılması için terim birliğinin sağlanması önemlidir. Bu tür uygulamaların önündeki en önemli engel terim kargaşası ve terim birliğinin sağlanamamasıdır. Belgenin hazırlanmasında uluslararası kabul görmüş terimler ve tanımlar kullanılmıştır. Metodun geçerli kılınması akreditasyon için teknik gerekliliklerin tanımlandığı ISO/IEC 17025 [12] standardında, metot geçerli kılma göstergeleri ise Uluslararası Metroloji sözlüğünde tanımlanmıştır [10].

Metodun geçerli kılınması bir teknik gereklilik olmasının dışında, metot hâkimiyetinin ispatlanması, laboratuvar ve personel yetkinliğinin kanıtlanması, laboratuvar birimlerinin etkin, verimli ve ahenkli çalışması, sertifikalandırma, laboratuvardaki uygulamada meydana gelen değişikliğin doğrulanması konularına da güvenilir çözümler getirmektedir.

Ele alınan konu ilaç, gıda, kimya, çevre, adli bilimler gibi alanlarda faaliyet gösteren laboratuvarların metodun geçerli kılınması çalışmalarına kılavuzluk etmesi amacı ile güncel literatür, standartlar gibi temel bilgi kaynakları kullanılarak hazırlanmıştır. Bu belgede;

- Metodun geçerli kılınması göstergeleri
- Metodun geçerli kılınmasının dokümantasyonu
- Metodun geçerli kılınmasının sürekliliğinin sağlanması

konuları ele alınmıştır.

Metodun Geçerli Kılınması Nedir?

Metodun geçerli kılınması bir teknik gereklilik olarak ISO/IEC 17025'te "bir laboratuvar, kalite sistemi gereklerini yerine getirdiğini, teknik olarak yeterli olduğunu, geçerli sonuçlar üretebildiğini göstermek zorundadır" şeklinde ifade edilir [12]. Yine aynı belgede akreditasyon için teknik gereklilikler kullanılan metodun geçerli kılınması, belirsizlik bütçesi beyanı, Sertifikalı Referans Malzeme (SRM) kullanımı, cihaz kalibrasyonu, ölçüm sonuçlarının izlenebilirliğinin

gösterilmesi ve karşılaştırmalara katılım gibi araçlar ile ifade edilmiştir. Bu teknik gerekliliklerden ilk üçü: metodun geçerli kılınması, ölçüm belirsizliği ve izlenebilirlik, ölçüm kalitesinin kanıtıdır. SRM kullanımı ve kalibrasyon izlenebilirlik zincirinin korunmasını sağlar. Kısaca özetlemek gerekirse geçerli kılma, ölçüm yönteminin amaca uygunluğunu, belirsizlik bütçesinin hesaplanması, ölçüm sonucunun istatistiksel olarak doğru ifade edilmesini, izlenebilirlik ise ölçüm sonucunun başka sonuçlar ile karşılaştırılabilmesini sağlar. Amaca uygunluk, talep sahibinin (müşteri) beklentileri ile belirlenir. Karşılaştırmalara katılım ise ölçüm sonucunun kontrolünü sağlar. Bunlara ek olarak, laboratuvarın hazırlayacağı kalite kontrol sistemleri metodun geçerli kılındığı tarihten sonra yapılan ölçümlerin de metodun geçerli kılındığı tarihteki ile aynı olmasını sağlar (ISO/IEC 17025 5.9)[12].

Metodun geçerli kılınması ISO/IEC 17025'de;

"özel amaçlı bir kullanım için gerekli şartların yerine getirildiğinin inceleme sonucunda teyit edilmesi ve objektif bir delilin elde edilmesi"

olarak tanımlanmıştır [12]. Uluslararası metroloji sözlüğünde ise ;

"belirtilen şartların amaçlanan kullanım için uygunluğunun doğrulanması"

olarak tanımlanır [10]. Her iki tanımdan da anlaşılacağı gibi metodun geçerli kılınmasının amacı bir ölçüm metodu kullanılarak yapılan her ölçüm sonucunun, analitin bilinmeyen içeriğine en yakın değer olmasının garanti altına alınmasıdır [323]. Bu tanım, metodun geçerli kılınmasının sadece objektif kanıtlar ile sunulması değil, belirsizlik olarak ifade edilebilecek ölçüm sonucunu etkileme olasılığı olan risklerin de tespit edilmesi ve raporlanması olarak yorumlanmalıdır [324]. Metodun geçerli kılınması ölçüm sonucuna etki eden parametrelerin tek tek ölçülerek ölçüm sonucuna etkilerinin belirlenmesi ve kanıtlanmasıdır.

ISO/IEC 17025'e göre laboratuvar,

- standart olmayan metotları,
- laboratuvarda geliştirilmiş metotları,
- amaçlanan kapsamları dışında kullanılan standart metotları,

amaçlanan kullanıma uygun olduklarını teyit etmek için geçerli kılmalıdır. Metot laboratuvarda ilk defa kullanıldığında, uygulayıcıda veya çalışma ortamında bir değişiklik olduğunda, kalite kontrol testlerinde değişiklikler fark edildiğinde, iki metot arasındaki benzerliği göstermek istediğinizde, örneğin yeni bir metot ve bir standart metot arasında, bir metodun standardizasyonunda, uzun bir süreden sonra metodu ilk defa uyguladığınızda geçerli kılma çalışmaları yapılır. Ayrıca karşılaştırmalarda da geçerli kılma göstergeleri raporlanır. Seçilen metot geçerli kılınmış ise onaylanmalı, geçerli kılınmamış ise geçerli kılınmalıdır. Geçerli kılınmış bir metodun uygulama koşullarında veya kapsamında değişiklik olduğu zaman tekrar geçerli kılınması gerekir. Örneğin, kolon çalışma sıcaklığı (30 – 40) °C için geçerli kılınmışsa ve ilk defa 45 °C'de uygulanacaksa, farklı bir matrikste/örnekte analiz yapılacaksa geçerli kılma tekrarlanır.

Metodun geçerli kılınmasının amacı, metot performansının ve amaca uygunluğunun ölçülebilir değerler ile ifade edilmesi, hata ve belirsizlik kaynaklarının belirlenmesi, metotlar arasındaki farkın belirlenmesi, yasal gerekliliklerin yerine getirilmesi, günlük uygulamalarda kontrol sınırlarının belirlenmesi, ölçüm kalitesinin belgelendirilmesi ve karşılaştırılabilirliğin sağlanması olabilir.

Metodun geçerli kılınması için önce analizin amacı, kapsamı, kabul kriterleri belirlenir ve kaydedilir. Kapsam belirlenirken analit, matriks, girişim yapma olasılığı olan maddeler, kullanılacak cihazlar, analist ve laboratuvar belirlenmeli, yasal gereklilikler tespit edilmelidir. Geçerli kılma sürecinde ölçüm sonucunun kullanım amacı, ölçüm çeşidi: nitel, nicel, günlük analiz sayısı, analiz

hızı, maliyeti verilecek kararları etkileyeceği için çalışmalara başlanmadan değerlendirilmeli ve amaca en uygun metotlar tespit edilmelidir. Bunlara ek olarak geçerli kılma araçları, kullanılacak kimyasal malzemelerin kalitesi belirlenir ve cihazların performansının metot için yeterli olup olmadığı kontrol edilir.

Laboratuvara ait fiziksel şartlar deney için uygun olduğunda geçerli kılma ön deneyleri yapılır. Ön deney sonuçları, kabul kriterleri kapsamında değerlendirilir. Geçerli kılma daima maliyetler, riskler ve teknik olasılıklar arasındaki bir dengedir. Tüm gereksinimler belirlenmeli ve karşılanmalıdır. Ön deney bulguları doğrultusunda gerekirse düzeltmeler ve tekrar deneyleri yapılır. Tüm geçerli kılma deneyleri yapılır. Sonuçlar amaca uygunluk çerçevesinde değerlendirilir. Son olarak tekrar geçerli kılma ve kalite kontrol göstergeleri belirlenir ve geçerli kılma sonuçları raporlanır. Uygulamanın gereklilikleri karşılanınca geçerli kılma sonlandırılır.

Metodun Geçerli Kılınması Göstergeleri

Geçerli kılma, değişik ülkelerin/kurumların veya organizasyonların gerekliliklerinin ifade edildiği birçok belgede farklı göstergelerle verilmiştir. Geçerli kılma çalışmaları için değişik kurumların çeşitli rehberler yayınladığı bilinmektedir (USP, US EPA, ICH gibi) [332][333][334][335][336]. Geçerli kılma çalışmalarında genel olarak adı geçen tüm göstergeler aşağıda listelenmiştir.

1. Doğruluk (Accuracy):
   - Gerçek değere yakınlık (Trueness)
   - Kesinlik (Precision)
2. Tekrarlanabilirlik (Repeatability)
3. Tekrar Gerçekleştirilebilirlik (Reproducibility)
4. Duyarlılık (Sensitivity)
5. Algılama Sınırı (Limit of Detection, LoD)
6. Tayin Sınırı (Limit of Quantification, LoQ)
7. Özgüllük/Seçicilik (Specificity, Selectivity)
8. Ölçüm/Çalışma Aralığı (Working Range) , Doğrusal Aralık (Linear Range)
9. Sağlamlık (Robustness)
10. Geri kazanım (Recovery)

Bu göstergelerin her birini kanıtlamak için ölçümler yapılır. Bu ölçümler veya göstergelerin tespiti için belirli bir sıralama yoktur. Metoda ve geçerli kılma gereksinimlerine bağlı olarak değişir.

Doğruluk, Ölçüm sonucu ile ölçülen büyüklüğün gerçek değeri arasındaki yakınlık derecesidir. Doğruluk nitel bir kavramdır, rakamsal olarak ifade edilemez. Uluslararası metroloji sözlüğünde "ölçülen büyüklük değeri ile ölçülenin gerçek büyüklük değeri arasındaki uyuşmanın yakınlığı" olarak tanımlanmıştır [JCGM 200, 2.13] [10]. ISO 5725'e göre doğruluğu tanımlamak için iki terim kullanılır: Gerçek değere yakınlık (trueness) ve kesinlik (precision)[337].

Gerçeklik, ölçülen değerlerin ortalamasının gerçek değere yakınlığını gösterir. Gerçek değer, bir büyüklüğün tanımına karşılık gelen değerdir. Bir büyüklüğün tanımı ile tutarlı büyüklük değeri olarak da tanımlanabilir [JCGM 200, 2.11]. Ölçüm gerçekliği bir büyüklük değildir ve bu nedenle sayısal olarak ifade edilemez. Ölçüm gerçekliği sistematik ölçüm hatası ile ters ilişkilidir, fakat rastgele ölçüm hatası ile ilişkili değildir. Uluslararası metroloji sözlüğünde "sonsuz sayıda tekrarlanan ölçülen büyüklük değerlerinin ortalaması ile referans büyüklük değeri arasındaki uyuşmanın yakınlığı" olarak tanımlanmıştır.

Kesinlik, ölçülen büyüklük için alınan bağımsız ölçüm sonuçlarının birbirine yakınlığının ölçüsüdür. Standart sapma (s) veya bağıl standart sapma (% RSD) ile ifade edilir. JCGM 200'de "belirli koşullar altında aynı veya benzer nesneler üzerinde tekrarlanan ölçümler ile elde edilen göstergeler veya ölçülen büyüklük değerleri arasındaki uyuşmanın yakınlığı" olarak tanımlanmıştır [JCGM 200, 2.15]. Kesinlik rastgele ölçüm hatası ile ilgilidir. Düzeltilemez fakat ölçüm tekrarı ve ortalamanın alınması ile azaltılabilir.

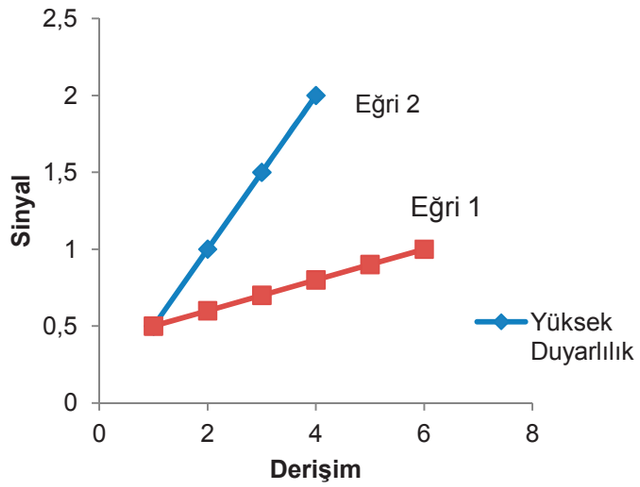
Ölçümün,

- aynı ölçüm prosedürü
- aynı operatör
- aynı ölçüm sistemi
- aynı uygulama koşulları altında
- aynı yerde
- aynı veya benzer nesneler üzerinde
- kısa bir zaman aralığında

tekrarlanarak gerçekleştirilmesini sağlayan koşullar **tekrarlanabilirlik** koşullarıdır. Ölçüm tekrarlanabilirliği bu koşullar altında elde edilen ölçüm kesinliğidir (JCGM 200, 2.20-21). Tekrarlanabilirlik için analiz yapılırken bu şartlar sağlanmalıdır. Aksi halde başka değişkenler işin içine gireceği için sonuçlar karşılaştırılamaz. Rutin analizler için farklı gün tekrarlanabilirlikleri kullanılması daha uygundur. Farklı gün tekrarlanabilirlikleri aynı laboratuvarda, aynı veya farklı cihazla, aynı veya farklı kişi tarafından farklı günlerde gerçekleştirilir.

Tekrar Gerçekleştirilebilirlik, ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirliği koşulları (farklı yerde, farklı operatör ve farklı ölçüm sistemleri kullanarak, aynı veya benzer nesneler üzerinde) altında hesaplanan ölçüm kesinliğidir [JCGM 200, 2.24-25]. Başka bir ifadeyle farklı ölçüm koşulları altında gerçekleştirilen, aynı ölçülen büyüklüğe ait ölçüm sonuçları arasındaki yakınlık derecesidir.

Duyarlılık, bir ölçüm sistemin göstergesindeki değişimin, buna karşılık gelen ölçülen büyüklük değerindeki değişime oranıdır (JCGM 200, 4.12). Kalibrasyon grafiğinin eğimidir. Şekil 473 incelendiğinde, derişim bir birim değiştiğinde eğri 1'de gösterilen sinyal değişimi düşük, eğri 2'de gösterilen sinyal değişiminin yüksek olduğu görülür.



Şekil 473. İki farklı ölçüme ait veri ile yapılan duyarlılık değerlendirmesi

Algılama Sınırı, bir ölçüm metodu ile güvenli bir şekilde algılanabilen en düşük analit derişimidir. Analitin varlığının belirlenebildiği ancak hesaplamanın yapılamadığı miktardır. İfade etmek için bazen LoD kısaltması kullanılır. Bir madde içindeki bir bileşenin varlığının yanlışlıkla öne sürülme olasılığının α olduğu durumda, yokluğunun yanlışlıkla öne sürülme olasılığının β olduğu ve belirli bir ölçüm prosedürü ile elde edilen ölçülen büyüklük değeridir (JCGM 200, 4.18). Algılama sınırı tespiti farklı şekillerde yapılabilir:

1. **Gözleme dayalı tespit:** Analit derişimi bilinen örneklerin analizi ile ölçülebilir en düşük miktarın belirlenmesidir. Analit derişimi bilinen örnekler analiz edilir ve güvenilebilir düzeyde ölçülebilen en düşük miktar belirlenir. Genellikle klasik analizlerde tercih edilir. Bu yöntem tecrübe gerektirir. Algılama sınırında analit içeren örnekler kullanılarak kalibrasyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin y eksenini kestiği nokta algılama sınırıdır.
2. **Sinyal/Gürültü oranına dayalı tespit:** Kromatografi gibi, zamana bağlı sinyal alınan analizlerde sinyal/gürültü oranının 2 veya 3 olması için gerekli derişim algılama sınırıdır.
3. **Standart sapmaya dayalı tespit:** Kör örneğin standart sapmasına dayalı tespit: Kör örnekle yapılan 10 ölçümün standart sapmasının 3 katı alınarak hesaplanır. Kör örnek ve kör örneğe algılama sınırına yakın derişimde analit ilave edilerek hazırlanan örnekle yapılan 10 ölçümün standart sapmasının 3 katı alınır. Kör örneğe yakın (çok düşük derişim değerine sahip) örnekle çalışıldığında derişim değeri hesaplamalarda kullanılmaz.

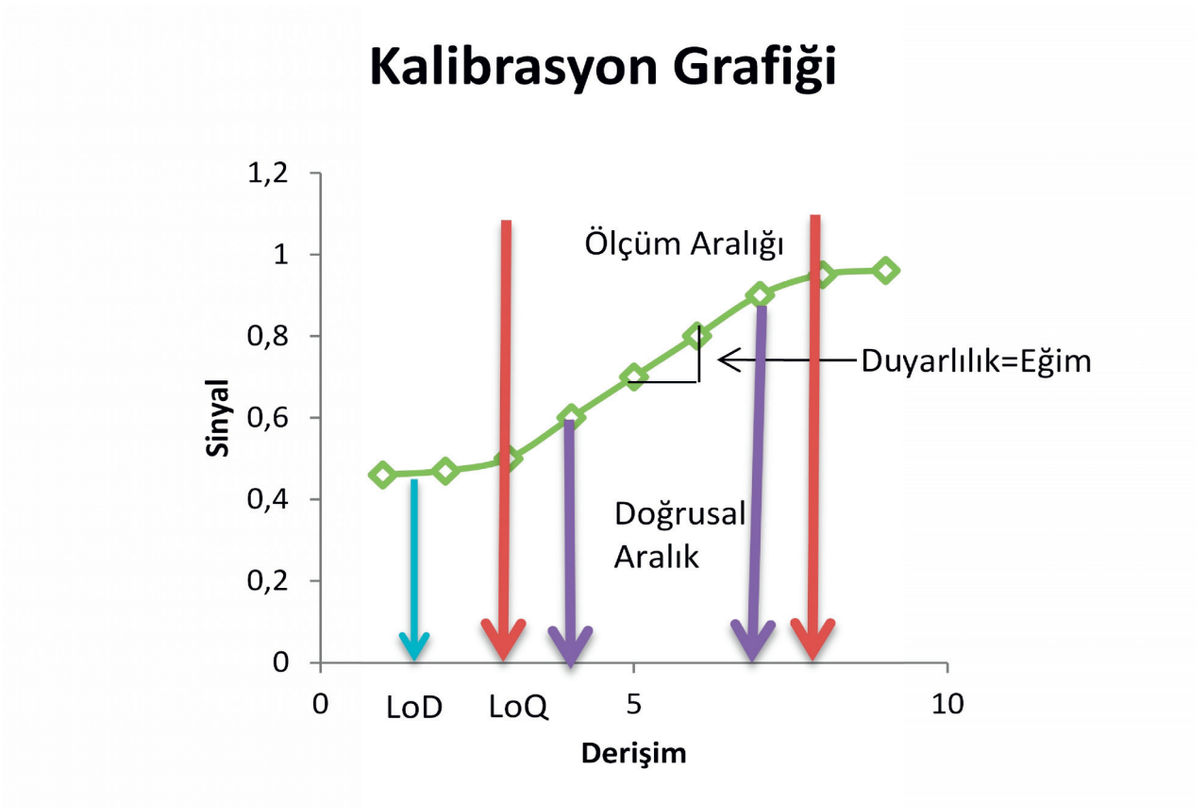
Tayin Sınırı, bir ölçüm metodu ile kabul edilebilir kesinlikte ve doğrulukta ölçülebilen en düşük analit derişimidir. Aynı zamanda raporlanabilen sınır olarak da bilinir. Tespiti için aşağıdaki yöntemler kullanılır:

1. **Sinyal/Gürültü oranına dayalı tespit:** Kromatografi gibi zamana bağlı sinyal alınan analizlerde sinyal/gürültü oranının 10 veya 20 olması için gerekli derişimdir. Genelde 10 alınır.
2. **Standart sapmaya dayalı tespit:** Kör örnek veya kör örneğe algılama sınırına yakın derişimde örnek ilave edilerek 10 okuma yapılır.
3. **Beklenen kesinlik (% RSD) değerine göre tespit:** Analit derişimine karşı % RSD grafiği çizilir. İstenen kesinlikteki (% RSD) derişim algılama sınırıdır.

Seçicilik, metodun, bir karışım veya bir matrisin içindeki belirli analitleri benzer davranış gösteren diğer bileşimlerin girişimi olmadan belirleme yeteneğini ifade eder [339]. Bir metodun, belirtilen deney koşullarında ilgilenilen analiti diğer bileşenler varlığında girişim olmaksızın doğru ve seçici olarak belirleme yeteneğidir [338]. Her ölçülenin değerinin, araştırılan olgu, cisim, maddeye ait diğer ölçülenlerden veya diğer büyüklüklerden bağımsız olduğu, bir ya da daha fazla ölçülen için ölçülen büyüklük değerlerini sağlayan, belirli bir ölçüm prosedürü ile kullanılan ölçüm sistemi özelliği (JCGM 200, 4.13) olarak da tanımlanabilir.

Özgüllük, metodun sadece ölçümü amaçlanan büyüklüğü ölçme yeteneğidir. % 100 seçicilik olarak da tanımlanır. Yok denecek kadar az sayıda özgül metot vardır. Fiziksel ölçümlerdeki seçicilik, kimyasal ölçümlerde kimi zaman özgüllük adını alır. (JCGM 200, 4.13). Özgül metotlar için en iyi örnek Nötron Aktivasyon analizidir. Bu analiz bir nükleer işlemdir. Çok büyük örnek miktarları ile analiz yapılacağında örnekten alt örnek alınır, nötron bombardımanına tutulur ve radyoaktif izotoplarının oluşması sağlanır. Her elementin radyoaktif emisyonu ve radyoaktif sönümlenme yolu farklı olduğu için metot o elemente karşı oldukça seçicidir. İzotop Seyreltme Kütle Spektroskopisi'nde (IDMS) her elemente uygun izotop internal standart olarak kullanılacağı için metot seçicidir.

Ölçüm Aralığı, belirli koşullar altında, belirsizliği bilinen bir ölçüm cihazı ya da ölçüm sistemi ile ölçülebilir aynı tür büyüklüklere ait değerler kümesi (JCGM 200, 4.7). Metodun uygulanabildiği aralıktır. Geçerli kılma deneyleri bu aralık göz önünde bulundurularak planlanır. Metot uygulandığında bu aralık uygun kesinlikte ve doğrulukta olmalıdır. Tekrarlanabilirlik çalışması tüm ölçüm aralığını kapsayacak şekilde farklı derişimlerde belirlenebilmelidir.



Şekil 474. Kalibrasyon grafiği.

Çalışma Aralığı, kalibrasyon grafiği üzerinde herhangi bir yer olabilir. Genelde doğrusal aralıkta çalışılır, ancak logaritmik de olabilir. Sinyale karşı derişim değişimini gösteren eşitlik bilindiği sürece kalibrasyon grafiğinin herhangi bir bölgesi olabilir. Doğrusal ilişki olmayan yerlerde eğim azaldığı için duyarlılık düşer.

Doğrusal Aralık, kalibrasyon grafiğinin doğrusal olduğu derişim aralığıdır. Bu aralık hesaplanırken 6 veya 10 farklı derişimde ölçüm yapılır. Her derişimden 3 veya 6 tekrar yapılır.

Sağlamlık, mükemmel uygulama koşullarından uzaklaşıldığı zaman metodun performansının ne kadar etkilendiğinin ölçütüdür. Metot geliştirilirken bu adımların tespit edilmesi gerekir. Bu adımlar, uygulama esnasında veya sağlamlık analizinde dikkate alınması gerekir. Metoda etki edebilecek değişkenler belirlenir. Referans maddeler, derişimi bilinen örnekler veya sertifikalı referans maddeler ile metot bir kez uygulanır. Uygulama sonuçlarının metodun doğruluğu, tekrarlanabilirliği ve ortalama değer üzerinde bu değişikliklerin etkisi belirlenir. Etkisi en büyük olandan en küçük olana göre sıralama yapılır. Bu kritik değişkenler göze alınarak kalite kontrol oluşturulur.

Geri Kazanım, analitik metotlar ile her zaman örnekteki analit miktarı tam olarak tayin edilemeyebilir. Geri kazanım, kullanılan metodun analit miktarının tamamını tespit edebilme etkinliğini ifade eden bir büyüklüktür. Geri kazanım çalışması üç şekilde yapılabilmektedir:

1. **Numuneye bilinen miktarda analit eklenerek:** Örneğe bilinen derişimi ve miktarda saf analit katılır. Buna bağlı olarak üç değer elde edilir ve geri kazanım Eşitlik (362) kullanılarak hesaplanır.

$$\% R = (C_1 - C_2) / C_3 \times 100 \quad (362)$$

C_1: Analit eklenmiş örneğin derişimi

C_2: Başlangıçtaki analit derişimi

C_3: Eklenen miktar

2. **Sertifikalı referans malzeme kullanılarak:** Bu tür çalışmada örnek olarak SRM kullanılmaktadır. SRM'lerin içinde bilinen miktarda tayini yapılacak analit vardır. Tayin sonucunda bulunan değerler sertifika değeri ile karşılaştırılır. Bu durumda, geri kazanım Eşitlik (363) kullanılarak hesaplanır.

$$\%R = \left(\frac{C_1}{C_2}\right) \times 100 \quad (363)$$

C_1: Örnekteki analit derişimi

C_2: Sertifikalı malzemedeki analit derişimi

3. **Referans metotla analiz yapılarak:** Referans metod ile yapılan analizler ve sonuçlar raporlandığı için karşılaştırmalı olarak geri kazanım hesaplanabilir.

Bir metodun geri kazanım oranında üç farklı geri kazanım bileşeni dikkate alınmalıdır.

$$R = R_m \times R_s \times R_{rep} \quad (364)$$

R_m : SRM veya ekleme yapılmış (spiked) örneğin geri kazanımı

R_s : farklı matrisler için düzeltme faktörü

R_{rep} : standart eklenen örneğin gerçek örneğe göre farklı davranmasından dolayı düzeltme faktörü

Eğer benzer matris SRM varsa, R_{rep}= 1 ve eğer tek matris çalışılıyorsa, R_s= 1 alınır.

Metodun Geçerli Kılınması Raporu

Geçerli kılma işlemleri tamamlandığında bir geçerli kılma raporu hazırlanır. Laboratuvar tarafından yapılan her bir deneyin, kalibrasyonun veya deney veya kalibrasyonlar serisinin sonuçları, doğru, açık, kesin ve tarafsız olarak ve deney veya kalibrasyon metotlarının bütün özel talimatlarına uygun bir şekilde rapor haline getirilmelidir [17025 5.10.1]. Rapor müşteri talebinin doğru bir biçimde yorumlanması için gerekli, kullanılan metoda ait tüm bilgileri içermelidir. Aynı zamanda rapor geçerli kılma çalışmasının tekrarının yapılabilmesi için yeterli bilgiyi içermelidir. Genel olarak metot geçerli kılma raporları: başlık, laboratuvarın adı ve adresi, deney raporunun tanımlanması için geliştirilmiş kodlama, müşteri adı ve adresi, kullanılan metodun tanımı, ölçüm(ler)e konu malzemenin tarifi, durumu ve açık kimliği, malzemenin laboratuvara kabul tarihi, ölçümün yapıldığı tarih, atıflar, birimleri ile birlikte ölçüm sonuçları, ölçümü gerçekleştiren kişilerin adları, görevleri, imzaları veya eş değer bilgiler, duruma göre sonuçların sadece malzemenin ölçümü yapılan alt örneğine ait olduğunu belirten beyan

bilgilerini içerir. Amacın, kapsamın, uygulama sürecinin, güvenlik önlemlerinin, çözelti hazırlama yöntemlerinin doğru tanımlanması, hesaplamaların gösterilmesi de pratik kolaylıklar sağlayacaktır.

Geçerli kılma işlemleri tamamlanmış bir metodun dokümantasyonu belirsizlik hesaplanmaları da eklenerek tamamlanır.

Daha önce geçerli kılınması yapılmış metot kullanılırken iki konu göz önünde bulundurulmalıdır. Geçerli kılınmış metodun bilgilerinin amaca uygun olup olmadığı, tekrar geçerli kılmaya gerek olup olmadığı; eğer geçerli kılma bulguları amaca uygun ise metodu kullanan laboratuvarın metodu belirtilen performansta kullanıp kullanamadığının test edilmesi gerekmektedir. Analizi yapan kişinin metotta belirtilen performansı gerçekleştirebilmesi de gereklidir. Metodu uygulamak için kullanılan malzeme ve cihazların istenen özellikleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir. Geçerli kılınmış metot kullanan her kişinin metodu uygulama performansı, geçerli kılma bulguları ile karşılaştırılmalıdır. Kişinin metodu uygulama performansı, metodun geçmişte yapılan geçerli kılma çalışmaları sırasında elde edilen performansından daha önemlidir. Benzer şekilde standart metot her laboratuvarda aynı sonucu vereceği varsayımıyla hareket edilmemelidir. Metodu kullanacak kişi, metodun uygulama alanında tecrübeli olsa bile yeni uygulayacağı metodu uygulama becerisini test etmeli ve istenen performansı elde ettikten sonra rutin kullanıma başlamalıdır. Bir metot laboratuvarda ilk defa uygulanırken, aşağıdaki kurallara uyulmalıdır: Analizi yapan kişi metodu uygulamadan önce metodu yakından incelemelidir. Metodu ilk defa uygulayacak kişi bu metodu daha önce uygulayan deneyimli kişinin gözetiminde ve paralel olarak uygulamalıdır. Deneyimli kişinin gözetimi, aday kişinin metodu tek başına belirlenen performansa ulaşıncaya kadar devam etmelidir. Analiz, yasal limitlere uygunluğu denetlemek amacıyla yapılıyorsa belirsizliğin doğru hesaplanması büyük önem taşır. Ölçüm sonucu raporlanırken belirsizliğin tipi (örneğin, genişletilmiş belirsizlik), güvenilirlik seviyesi ile birlikte verilmelidir. Sonuç “yok” veya “tayin limitinden az” olarak raporlanacağı zaman metodun tayin limiti konusunda ek bilgiler ve açıklamalar verilmelidir.

7.9.2.3 Kimyasal Ölçümlerde Belirsizlik Hesaplaması

Bir ölçüm sonucu ölçüm belirsizliği değeri ile birlikte verildiğinde anlamlı olmaktadır. Ölçüm belirsizliği değeri ile verilen ölçüm sonucu diğer ölçüm sonuçları ile karşılaştırılabilinir ve/veya ölçüm sonucunun hedeflenen amaca uygunluğuna karar verilebilir. 1970 yılına kadar ölçüm sonuçları hata ile ifade edilmektedir ancak 1970 yılından itibaren ölçüm belirsizliği ifadesi kullanılmaya başlanmıştır. Ölçüm sonuçlarının belirsizliğinin değerlendirilmesi ve ifade edilmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmıştır.

1977 yılında, uluslararası uzlaşmanın sağlanması ve ortak yaklaşımın oluşturulması amacıyla, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu’na (BIPM) bağlı olan çeşitli ulusal metroloji enstitüleri ile dünyanın ölçüm bilimi sahasındaki en büyük otoritesi olan Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) arasında işbirliği kurulmuştur. Sorunların çözümü için 32 adet ulusal metroloji enstitüleri arasında anket yapılmıştır ve 21 adet ulusal metroloji enstitüsü ankete geri bildirimde bulunmuştur. 1980 yılında, önerilerin değerlendirilmesi amacıyla ulusal metroloji enstitüleri BIPM’de toplantıya çağrılmıştır. 1980-1986 yıllarında tüm öneriler değerlendirilmiş ve 1986 yılında BIPM’nin de onayı ile tavsiyelerden ortak yaklaşım belirlenmiştir.

1993 yılında, ölçüm belirsizliği için bir rehber doküman oluşturulmuştur [325][23]. 1995 yılında analitik ölçümler için EURACHEM/CITAC tarafından bir rehber doküman olarak laboratuvarların hizmetine sunulmuştur ve 2000 yılında bu doküman revize edilmiştir [322]. 2011 yılında üçüncü revizyonu yapılmıştır ve rehber olan bu dokümanda analitik ölçümlerde ölçüm belirsizliğinin nasıl hesaplanacağı açıklanmaktadır. Ayrıca bu dokümanlar dışında kimyasal ölçümlerde belirsizlik hesaplaması yapılırken farklı dokümanlardan da yararlanılabilinir [23][329].

Ölçüm Belirsizliğinin Tanımı

Ölçüm belirsizliği, ölçüm sonucu ile birlikte verilen ve belirlenen güvenirlik seviyesinde ölçüm değerlerinin dağılımını gösteren bir parametredir. Kısaca açıklamak gerekirse, ölçüm belirsizliği ölçüm sonucunun kalitesinin bir göstergesi olup elde edilen ölçüm sonucunun hangi sınırlar içinde yer aldığını göstermektedir [10].

Ölçüm Belirsizliğinin Önemi

Ölçüm belirsizliği, elde edilen sonucun kalitesini ve güvenirliğini gösterdiği için oldukça önemlidir. Başka bir deyişle, ölçüm belirsizliği sonucun gerçek değeri ne ölçüde temsil ettiğini göstermektedir. Bu nedenle ölçüm belirsizliği sonucu kullanacak kişiye sonucun güvenirliğini değerlendirmesinde olanak sunmaktadır. Ölçüm belirsizliği, elde edilen ölçüm sonuçlarının farklı laboratuvarlar tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bunun dışında, ölçüm belirsizliği elde edilen ölçüm sonucunun kabul edilebilir sınırlar içersinde içerisinde olup olmadığını da göstermektedir. Ölçüm belirsizliği, ölçüm prosedürü hakkında bilgi vermekte ve ölçüm prosedürünün dokümantasyonunun yapılmasına yardımcı olmaktadır. Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında belirsizlik kaynakları belirlendiğinden ve en büyük belirsizlik kaynağı tespit edilebildiğinden ölçüm prosedürünün geliştirilmesine de olanak sağlamaktadır. Ayrıca, ölçüm belirsizliği, ISO/IEC 17025 göre laboratuvarların akreditasyonunun bir gerekliliğidir.

Bu yüzden analizi dolayısıyla ölçüm sonucunu etkileyen tüm belirsizlik faktörleri sistematik olarak incelenerek elde edilen değerler istatistiksel olarak değerlendirilmeli ve bütün kaynaklardan elde edilen ölçüm belirsizliği değerlerinin bileşkesi alınarak ölçüm sonucu ile verilecek olan ölçüm belirsizliği hesaplanmalıdır.

Ölçüm Belirsizliği İfade Tipleri

Ölçüm belirsizliğinin üç ifadesi bulunmaktadır. Bunlar;

- Standart ölçüm belirsizliği
- Bileşik standart ölçüm belirsizliği
- Genişletilmiş ölçüm belirsizliği

olarak sıralanmaktadır [322][327][328].

Bileşik standart ölçüm belirsizliğinden genişletilmiş ölçüm belirsizliğini elde etmek için kullanılan ve birden büyük bir faktör ile ifade edilen kapsam faktörü (k),

k = 2 için % 95,5

k = 3 için % 99,7

güvenirlik aralığına karşılık gelmektedir. Daha detaylı bilgi “Ölçüm Belirsizliği” bölümünde verilmiştir.

Standart ölçüm belirsizliğinin ölçülen büyüklük değerinin mutlak değerine oranı alındığında ise bağıl standart ölçüm belirsizliği elde edilmektedir [322][327][328].

Ölçüm Belirsizliği Bütçesinin Oluşturulması

Ölçüm belirsizliği bütçesi, Uluslararası Metroloji Sözlüğü'nde ölçüm belirsizliğini, bileşenlerini, bunların hesaplanmasını ve kombinasyonlarını içeren beyan olarak tanımlanmaktadır [10]. Ölçüm belirsizliği bütçesinin oluşturulmasından önce "ne zaman ölçüm belirsizliği bütçesi oluşturulmalıdır" bu konuda bilgi vermek gerekir.

Ölçüm belirsizliği bütçesi aşağıdaki koşullar söz konusu olduğunda oluşturulmalıdır [322][327][328]:

- Laboratuvarda yeni bir prosedür kullanılmaya başlandığında,
- Laboratuvarda önceden kullanılan prosedürdeki kritik faktörlerde (cihaz, operatör, örnek türü gibi) değişim olduğunda ve bu kritik parametreler ölçüm sonucunu etkilediğinde,
- Metodun geçerli kılınması süresince.

Ölçüm belirsizliği bütçesi oluşturulurken aşağıda açıklanan ölçüm belirsizliği hesaplama adımları dikkate alınmaktadır [322]:

Adım 1. Ölçülen büyüklüğün tanımlanması

Adım 2. Belirsizlik bileşenlerinin belirlenmesi

Adım 3. Belirsizlik bileşen değerlerinin hesaplanması

Adım 4. Bileşik standart ölçüm belirsizliğinin hesaplanması

Adım 5. Genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin hesaplanması

Adım 6. Ölçülen büyüklüğün hesaplanması

Adım 7. Ölçülen büyüklüğün genişletilmiş ölçüm belirsizliği ile birlikte raporlanması

Belirsizlik bileşenlerinin değerlerinin hesaplamasında, metodun geçerli kılınması verilerinin kullanıldığı yukarıdan aşağıya (top down) yaklaşımı ve ölçüm modelinin kullanıldığı aşağıdan yukarıya (bottom up) yaklaşımı olmak üzere iki yaklaşım mevcuttur.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımında, metodun geçerli kılınması parametreleri belirlenir ve her bir parametreden kaynaklanan standart ölçüm belirsizlikleri hesaplanır. Aşağıdan yukarıya yaklaşımında ise, metot ile ilgili tüm detaylar sıralanır ve ölçüm modeli oluşturulur. Uluslararası Metroloji Sözlüğü'nde ölçüm modeli, bir ölçüm içerisinde yer aldığı bilinen bütün büyüklükler arasındaki matematiksel ilişki olarak tanımlanmaktadır. Ölçüm modeli kullanılarak ölçüm sonucunu etkileyebilecek parametreler belirlenir ve her bir parametre için standart ölçüm belirsizliği hesaplanır. Her iki yaklaşımda da bulunan standart ölçüm belirsizlikleri uygun eşitlikler kullanılarak birleştirilir ve bileşik standart ölçüm belirsizliği hesaplanır. Bileşik standart ölçüm belirsizliğinin kapsam faktörü ile çarpılarak elde edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği ölçüm sonucu ile raporlanır.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımındaki avantajlar aşağıda gibi sıralanmaktadır:

- Kullanımı kolaydır,
- Belirsizlik hesaplamasında derin bilgi gerektirmez,
- Hesaplama içersinde bütün etkiler vardır,
- Gerçekçi belirsizlik değerleri hesaplanır.

Dezavantajı ise analiste metot geliştirme aşamasına yardımcı olmamaktadır.

Aşağıdan yukarıya yaklaşımın avantajlar aşağıda gibi sıralanmaktadır:

- Metot geliştirme aşamasında yardımcı olur,
- Belirsizlik bütçesine etki eden parametreler kolayca görülür.

Dezavantajları ise;

- Tecrübe gerektirir
- Ölçüleni tanımlama zorluğu vardır
- Ölçüm modelini yazma zorluğu vardır
- Çoğu zaman matriksten analiti ayırmak zor olduğundan ve örnekteki diğer bileşenlerden kaynaklanan girişimlerden dolayı belirsizlik katkıları kolayca hesaplanamaz
- Örneğin homojenliğinden kaynaklanan sorunlar gözlenemez

şeklinde sıralanmaktadır.

Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımında A tipi ve B tipi olmak üzere iki çeşit hesaplama yöntemi mevcuttur. Uluslararası Metroloji Sözlüğü'nde A tipi ölçüm belirsizliği değerlendirmesi, belirli ölçüm koşulları altında elde edilen ölçülen büyüklük değerlerinin istatistiksel analizi ile ölçüm belirsizliği bileşeninin hesaplanması olarak tanımlanırken; B tipi ölçüm belirsizliği değerlendirmesi , A tipi ölçüm belirsizliği değerlendirmesi dışında kalan yöntemler ile ölçüm belirsizliği bileşenlerinin hesaplanması olarak tanımlanmaktadır [10]. Başka bir deyişle, A tipi hesaplama yönteminde elde edilen ölçüm sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi iken B tipi hesaplama yönteminde ölçüm belirsizliğini etkileyebilecek diğer kaynakların belirsizlik değerlerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesidir. B tipi hesaplama yöntemindeki veriler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [322]:

- Daha önceden gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler
- Daha önce gerçekleştirilen metot geçerli kılma çalışmaları sonuçları
- İlgili malzemeler ve kullanılan cihazlar konusundaki deneyim ve önceden edinilmiş bilgiler
- Üretici firmanın kalibrasyon sonuçları (tartımda kullanılan terazinin, hacim ölçümünde kullanılan hacim kaplarının sertifikalarındaki belirsizlik değerleri gibi)
- Sertifikalı referans malzemelerin sertifikalarda bulunan belirsizlik değerleri
- El kitaplarından alınan referans verilere ilişkin belirsizlik değerleri

İstatistiksel değerlendirmelerde farklı dağılım kabulleri olmakla birlikte kimyasal ölçümlerde genellikle A tipi hesaplama yönteminde normal dağılım ve student dağılım, B tipi hesaplama yönteminde normal, dikdörtgen ve üçgen dağılım kabulleri yapılmaktadır. Dağılımlarla ve dağılım kabulleri ile yapılan hesaplamalar "Ölçüm Belirsizliği" bölümünde verilmiştir. Kimyasal ölçümlerde cam malzemeler için tekrarlanabilirlik çalışmalarında sonuçlar tek bir değer etrafında yakın dağılım göstereceğinden genelde üçgen dağılım kabulü yapılmaktadır. Şüphe duyulan durumlarda ise dikdörtgen dağılım kabulü yapılmaktadır [322][327][329].

A tipi ve B tipi hesaplama yöntemleri dikkate alınarak hesaplanan standart ölçüm belirsizlikleri ile bileşik standart ölçüm belirsizliği hesaplanmaktadır:

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 + \ldots} \qquad (365)$$

$$u_c(y) = \sqrt{(u(p))^2 + (u(q))^2 + \ldots} \qquad (366)$$

y : ölçüm sonucu
$u_c(y)$: y ölçüm sonucuna ait standart ölçüm belirsizliği
u(p) : p belirsizlik kaynağına ait standart ölçüm belirsizliği
p : p belirsizlik kaynağına ait p'nin ortalama değeri
u(q) : q belirsizlik kaynağına ait standart ölçüm belirsizliği
q : p belirsizlik kaynağına ait q'nun ortalama değer

Genişletilmiş ölçüm belirsizliği;

$$U = k \times u_c(y) \quad (367)$$

kullanılarak hesaplanır.

Belirsizlik Kaynakları

Genel olarak belirsizlik kaynakları aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır [322]:

- Örnekleme
- Depolama koşulları
- Ölçüm cihazları
- Çözücü saflıkları
- Varsayılan stokimetri
- Ölçüm ve ortam koşulları
- Örnek etkileri
- Hesaplamadan kaynaklanan etkileri
- Kör örnek (blank) düzeltmeleri
- Operatör (analist)
- Rastgele etkiler

Aşağıdan yukarıya yaklaşımındaki belirsizlik kaynakları aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

- Örnek alma
- Örnek hazırlama (saflık, tartım, çözme, seyreltme, sıcaklık gibi)
- Tekrarlanabilirlik
- Kalibrasyon eğrisi
- Geri kazanım

Bu kaynakların ölçüm modeline bağlı olarak birkaçı veya hepsi olabilmektedir.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımındaki belirsizlik kaynakları ise aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

- Örnekleme
- Ön işlemler
- Metot biası
- Koşullardaki değişim
- Örnek matriksindeki değişim

Yukarıda bahsi geçen kaynaklar aşağıdaki şekilde detaylandırılmaktadır:

- Tekrarlanabilirlik
- Ara kesinlik
- Geri kazanım

- Doğrusal aralık
- Gerçeklik parametreleri belirsizlik kaynakları

Bu kaynakların ölçüm prosedürüne ve metodun geçerli kılınmasındaki parametrelere bağlı olarak birkaçı veya hepsi olabilmektedir.

7.9.2.4 Kimyasal Ölçümlerde İzlenebilirliğin Sağlanması

Yapılan bir kimyasal ölçümde güvenilir bir şekilde karar vermek için geçerli analitiksel sonuçlara sahip olunmalıdır. Yapılan ölçümlerin geçerliliğinin sağlanabilmesi için de elde edilen sonuçların gerek ulusal gerekse uluslararası farklı laboratuvarlarda yapılan ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılabilir olması gerekmektedir. Böyle bir durumun sağlanabilmesi, bütün laboratuvarların aynı ölçüm derecesini veya referans noktasını kullanmasıyla mümkün olur. Birçok durumda bu karşılaştırılabilirlik, birincil ulusal veya uluslararası standartlara diğer bir ifadeyle Uluslararası Birimler Sistemi'ne (SI) ulaşan bir kalibrasyon zinciri kurarak gerçekleştirilir. Kalibrasyon, standardın cihazla yapılan ölçüm sonucu ile standardın gerçek değeri arasındaki ilişki kurma işlemidir. Bu açıklamaya örnek olarak analitiksel terazilerin kalibrasyonu verilebilir. Her bir terazi ulusal standartlara veya birincil kilograma göre kontrol edilmiş referans ağırlıklarca kalibre edilir.

Yapılan açıklamalarla ilişkili olarak izlenebilirlik, bir ölçüm sonucunun her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan belgelendirilmiş kesintisiz bir zincir aracılığı ile belirli bir referansa ilişkilendirilebilme özelliği şeklinde tanımlanmaktadır [10].

İzlenebilirliği Sağlama Adımları

İzlenebilirliği oluşturmak için;

i. Ölçülenin tanımlanması, ölçüm kapsamının ve kabul edilebilir belirsizliğin belirlenmesi
ii. Uygun hesaplama, ölçüm şartları gibi unsurları içeren metodun belirlenmesi
iii. Geçerli kılma (validasyon) işlemi yaparak sonucu etkileyen bütün parametreleri içeren hesaplama ve ölçüm şartlarının belirlenmesi
iv. Her bir etkili parametrenin bağıl öneminin tanımlanması
v. Uygun referans standartların seçilmesi ve kullanılması
vi. Belirsizliğin belirlenmesi

adımları takip edilmelidir.

Ölçülenin ve İstenilen Belirsizliğin Belirlenmesi

Anlamlı bir ölçüm, ölçülenin tam bir biçimde tanımlanmasını gerektirir. Bu amaç doğrultusunda ölçülen ifade edilebilir fakat ölçülenin tanımlanmasının yanında analitin özelliği, uygulanan ölçüm koşulları, geri kazanım düzeltmesi ve metodun terimler halinde belirtilmesi gibi bazı önemli tanımlamalar da yapılmalıdır.

İzlenebilirlik oluşturulurken göz önünde bulundurulması gereken diğer bir unsur da istenilen ölçüm belirsizliğinin belirlenmesidir. Bu parametrenin belirlenmesi önemlidir çünkü:

a) Sonucun belirsizliği kullanılan standardın ölçümünden kaynaklanan belirsizlikten daha iyi olamaz; belirsizlik gereksinimleri ölçüm standartlarının seçimini etkiler.
b) Belirlenen bir ölçüm tekniğinde, daha küçük toplam belirsizlik elde etmek için büyük dikkat gereklidir. Böylelikle kontrol edilmesi gereken değişkenlerin sayısı artacaktır.

Uygun Metodun Seçilmesi

Ölçülen uygun bir biçimde belirlendikten ve anlaşıldıktan sonra isteği karşılayan ölçüm metodu seçilmeli veya geliştirilmelidir. Metot seçilirken, gereksinimler, maliyet, farklı metotlardan elde edilen tecrübeler, gerekli cihazların elde edilebilirliği ve kritik basamaklar göz önünde bulundurulmalıdır.

İzlenebilirliğin oluşturulması ile ilişkili olan metot parametreleri üzerinde geçerli kılma (validasyon) yapılmalıdır.

Geçerli Kılma (Validasyon)

Geçerli kılma (validasyon) işleminin tanımı önceki kısımlarda yapıldığı için burada tekrarlanmayacaktır. Bunun yanı sıra izlenebilirliğin sağlanması için validasyon işlemi aşağıdaki aşamaları kapsamalıdır.

a) Metodun ilgilenilen türleri diğerlerinden ayırabildiğinden emin olmak için seçiciliği ve özgüllüğü değerlendirilmelidir.
b) Bağımsız olarak elde edilen izlenebilir değer ile metodun uygulanmasıyla elde edilen değer arasında anlamlı bir fark olmadığını ispatlamak için sertifikalı referans madde kullanılmalıdır.
c) Özel fakat metodun üzerinde kısmen etkili olan parametreler mantıksal bir biçimde incelenmelidir.
d) Ölçümler sırasında beklenmeyen bir etkinin oluşmaması için belli aralıklarda metot tekrar uygulanarak metodun kesinliği belirlenmelidir.
e) Ölçüm sonuçlarının lineer olduğu çalışma aralığı belirlenmelidir.

Analiz eden kişiler veya farklı laboratuvarlar arasında farklı metotlarla karşılaştırmalar da yapılabilir.

Validasyon çalışmalarında önemli olan diğer bir unsur da kendisi izlenebilir olan, metodu kontrol, kalibre ve test etmek için kullanılan referanslardır.

Validasyon izlenebilirliğin sağlanması için olmazsa olmaz bir işlemdir. Standart bir metot kullanılsa bile kendi sistemimize adapte ettiğimizde yine gerekli validasyon aşamaları yapılmalıdır.

Farklı Etkili Parametrelerin Önemi

Uygun kontrol ve kalibrasyon için ölçüm üzerinde etkili olan parametrelerin bağıl öneminin belirlenmesi gereklidir. Metodun uygulanışı sırasında bazı şartların kontrolü daha iyi yapılabilse de bazılarının kontrolü güçtür ki kontrolü daha iyi yapılan şartlar bile kimi zaman istenilenin dışına çıkabilir. Bu aşamada yapılması gereken işlem metodun şartlarında belirli değişiklikler yaparak etkilerini tespit etmektir. Böylece metodun sağlamlılığı belirlenmiş olur.

Uygun Referans Standartların Seçilmesi ve Kullanılması

Ölçüm eşitliğinde kullanılan bütün değerlerin uygun bir referansa izlenebilir olduğundan emin olmak için, cihazların ölçümüyle ilgili kalibrasyon prosedürlerinin oluşturulması veya bazı değerlerin kontrol altında tutulması, sertifikalandırma veya ölçümde kullanılan bütün referansların kontrolünün yapılması gerekir. Valide edilmiş bir metotla yapılan kalibrasyon izlenebilirliğin en önemli noktasıdır.

Normalde kalibrasyonda kullanılacak malzeme ve sertifikalı referans standartlar her zaman mevcut olmayabilir, fakat ölçüm standartları doğru seçilerek uygun bir kontrol sağlamak

gereklidir. Özel kimyasal ölçümler için farklı türde ölçüm standartları mevcuttur ve bunların kullanımları için birçok farklı durum vardır. Göz önünde bulundurabilecek referanslar:

- Analitiksel iş sırasında yapılan fiziksel ölçümler
- Malzemenin yapısının doğrulanması
- Sertifikalı referans malzemelerle kalibrasyon
- Referans bilgileri kullanarak kalibrasyon
- Metot geliştirme, validasyon ve doğrulama

Belirsizliğin Belirlenmesi

Belirsizlikle ilgili ayrıntılı bilgi daha önceki bölümlerde verildiği için burada tekrar verilmeyecektir fakat izlenebilirliğin sağlanması açısından belirsizlikle ilgili en temel gereklilikler:

- Ya ölçüm sonucunun belirsizliğine etki eden her bir referans değer belirsizliğinin katkısının belirlenmesi ya da uygunsa kullanımda olan standart metodun kalibrasyon ve kontrol gerekliliklerine uyulması
- Kullanılan referansların etkileri göz önünde bulundurularak sonucun toplam belirsizlik değerlendirilmesinin yapılması
- Toplam belirsizliğin istenilene uyup uymadığının doğrulanmasıdır.

İzlenebilirliğin Raporlanması

İzlenebilirlikle ilgili hazırlanan rapor

- Kullanılan bütün kimyasal kalibrasyon standartları
- Ölçüm şartlarının kontrolü için kullanılan referans standartların tanımlanması

hususlarını içermelidir [321]

7.9.2.5 Sertifikalı Referans Malzemeler

Referans malzeme (RM), nominal özelliklerin incelenmesinde veya bir ölçüm sürecinde istenilen, kullanıma uygun olduğu tespit edilmiş belirli özelliklerle yeterince homojenlik ve kararlılık sağlayan bir malzeme şeklinde tanımlanmaktadır. Sertifikalı referans malzeme (SRM) ise yetkili merci tarafından belgelendirilmiş referans malzemedir. Bu belgedeki malzemenin değeri geçerli kılınmış bir metotla belirlenerek belirsizlik değeri ve izlenebilirliğiyle birlikte verilmektedir [331].

Sertifikalı referans malzeme,

- Metodun geçerli kılınması,
- Ölçüm belirsizliğin belirlenmesi,
- Ölçüm sonuçlarının izlenebilirliğinin sağlanması

amacıyla kullanılır.

Sertifikalı referans malzemenin ölçüm üzerinde etkili olabilecek bütün analitiksel problemleri içermesi için analizi yapılan örnekle benzer matriste olması gerekir. Kullanıcı bilinmeyen örneğe uyguladığı metodu aynen sertifikalı referans malzemenin analizinde kullanmalıdır.

Sertifikalı referans malzeme seçilirken,

- Seviye
- Matriks
- Şekil
- Miktar
- Kararlılık
- Kabul edilebilir belirsizliğe sahip sertifika değeri

gibi özellikler dikkate alınmalıdır.

SRM, kullanılması planlanan ölçüm metodu özellikleri ile uygun seviyeye sahip olmalıdır. Bu özelliklere konsantrasyon örnek olarak verilebilir.

Metodun doğruluğunun en iyi bir biçimde tespit edilmesi için kullanılacak olan SRM çalışılacak örneklerle benzer matrise sahip olmalıdır.

SRM, katı, gaz vb fiziksel yapıda olabilir. Bir test parçası veya bir toz olabilir. Yöntemin uygulanmasından önce hazırlanma gerektirebilir. Her ne şekil olursa olsun analizi yapılan örnek ile aynı şekilde olmalıdır.

Kullanılacak SRM'in miktarı tekrarlı bir şekilde metodun uygulanmasına fırsat verecek büyüklükte olmalıdır.

Nerede olursa olsun ölçüm boyunca SRM kararlı olmalıdır. Bunun için şu üç durum söz konusu olabilir.

1. Özellikler kararlıdır ve herhangi bir önlem alınmasına gerek yoktur.
2. SRM içerindeki bileşenlerin sertifika değeri saklama koşullarına bağlı olarak değişebilir, böyle bir durumda SRM açılmadan önce ve açıldıktan sonra sertifikada belirtilen koşullarda saklanmalıdır.
3. Yine SRM içerisindeki bileşenlerin sertifika değeri belirli bir süre kendisini korur şeklinde sertifikada belirtilmektedir.

Sertifika değerinin belirsizliği istenilen kesinlik ve doğruluk gerekliliklerini sağlamalıdır.

Sertifikalı referans malzemenin üretilmesi, analitiksel süreçteki önemi sebebiyle titizlikle yürütülmesi gereken bir işlemdir. Üretim ve sertifikalandırılma süreci, planlama, homojenlik, kararlılık ve karakterizasyon gibi adımları içermektedir. Güvenilir bir SRM elde etmek için bu adımların ayrıntılı bir biçimde incelenmesi ve yerine getirilmesi gerekmektedir [330].

8. KAYNAKLAR

[1] Kısaca Metroloji, 3. baskı, www.ume.tubitak.gov.tr, 2008

[2] The International System of Units (SI), BIPM (8th edition), 2006

[3] İ. Koçaş, “Geçmişten Günümüze Ölçü Birimleri ve Metroloji“, TÜBİTAK Bilim ve Teknik, Sayfa 28-33, Ekim 2009

[4] Şükrü Halûk Akalın, Binyıl Önce Binyıl Sonra Kâşgarlı Mahmud ve Divanü Lugati’t-Türk, TDK yayınları, 2008

[5] Feza Günergün, “Metroloji Geleneksel Ölçü ve Tartılardan Metre Sistemine”, Osmanlı Uygarlığı, Yayına Hazırlayan: Halil İnalcık, Günsel Renda, ISBN 9751730767, 402-413, 2004

[6] Kanunname-i İhtisab-ı Bursa, TSE yayını, Ankara, 2011

[7] Hüsamettin YALHI, Ölçü Mevzuatı, İstanbul, 1997

[8] Birol ALTAN, Türkiye'de Ulusal Metroloji Merkezi Kurulması Üzerinde İnceleme, TÜBİTAK MAE, Gebze, 1982

[9] 8 Ocak 1998 Tarih ve 23224 Sayılı Resmi Gazete

[10] JCGM 200:2008, International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 2008.

[11] International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML), OIML, 2000

[12] ISO/IEC 17025, Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Şartlar, 2005

[13] Elements for a Law on Metrology, Edition 2004 (E)

[14] www.bipm.org

[15] 90/384/AT “Otomatik Olmayan Tartım Cihazları Yönetmeliği”, 15.04.2000

[16] 22/AT/2004 “Ölçü Aletleri Yönetmeliği

[17] www.oiml.org

[18] Convention Establishing an International Organisation of Legal Metrology, January 2000

[19] Uluslararası Yasal Metroloji Teşkilatı (OIML) ve bünyesinde bulunan Uluslararası Yasal Metroloji Komitesi (OIML), T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 14.09.2011

[20] Framework for a Mutual Acceptance Arrangment on OIML Type Evaluations, 2011

[21] www.ekonomi.gov.tr

[22] D.Yücel, Ölçüm Belirsizliği ve Laboratuvar, yıl 1, sayı 2, s. 30 – 32, 2003

[23] JCGM 100:2008, Evaluation of Measurement Data- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), JCGM, 2008

[24] EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European Accreditation, December 1999

[25] T. Doiron, J. S. Beers "The Gage Block Handbook", National Institute of Standards and Technology, 1995

[26] Barrel H. "The Metre" Contemp. Phys. 3, 415-434, 1962

[27] Giacomo P. "The New Definition of the Metre", Am. J. Phys. 52, 607-613, 1984

[28] T.H.Maiman, Brit.Commun.Electron., 1, 674, (1960)

[29] Nobel Fizik Ödülleri ve Sunumları, www.nobelprize.org

[30] P.Gill and F.Riehle, Report to the 17th Session of the CCTF Joint CCL CCTF Working Group on Secondary Representations of the Second, (2006)

[31] Hamid R., Cetintas M. and Celik M., 2004, Observation of Faraday resonances on the S-D two-photon transition of Rb atoms, Physical Review A, 70, 025805/1

[32] W. Demtröder, Lazer Spectroscopy, 2nd edn (New York: Springer) 1996

[33] Erdoğan C., “532 ve 1064 nm Dalga Boylarında Optik Frekans Standardının Oluşturulması ve Endüstriyel Uygulamaları”, MSc. Thesis, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2004

[34] R. Holzwarth et al., “Optical clockworks and the measurement of lazer frequencies with a mode-locked frequency comb”, IEEE J. Quantum Electron. 37, 1493 (2001)

[35] Yandayan T., “Large Measurement Range Mechanical Comparator for Calibration of Long Gauge Blocks,” Proc 17th IMEKO World Congress - Metrology in the 3rd Millennium Dubrovnik, Croatia,1876-1881, June 22-27, 2003

[36] Yandayan T. ve Akgöz S.A “ Karşılaştırmalı ölçümler ve ülkemizin durumu” , VII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, İzmir, Makine Müh. Odası, 30 Ekim – 01 Kasım 2008

[37] Akgöz S.A. ve Yandayan T., “Mastar Bloklarında İnterferometrik ölçümler”, IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 65-73, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 25-26 Ekim 2001

[38] Akgöz S. A. ve Yandayan T., "Uzunluk Standardı Metre'nin Endüstriye sunumu: Mastar Blokları" Üretimde Kalite Dergisi, Aralık 2001, İstanbul

[39] G2BM-010 Eğitim Dokümanı “Mastar Bloğu Kalibrasyonu Ve Belirsizlik Hesapları”

[40] Bönsch G., Automatic Gauge Block MEasurement by Phase Stepping Interferometry with Three LAser Wavelengths, Proc. SPIE 4401, 2001

[41] R. Schödel, G. Bönsch, Precise interferometric measurements at single crystal silicon yielding thermal expansion coefficients from 12 C to 28 C and compressibility, SPIE 4401, 54-62, 2001

[42] A. Lewis, Measurement of length, surface from and thermal expansion coefficient of length bars up to 1.5 m using multiple wavelength phase-stepping interferometry, Meas. Sci. Technol. 5, 694-703, 1994

[43] Hecht E., 1990 Optics, Addision-Wesley Publishing Company

[44] Şendoğdu D., PhD Thesis, 2007, The Kösters Interferometer for Gauge Block Length Measurement, METU

[45] Hamid R., Sendogdu D. and Erdogan C., 2005, The temperature stabilization and temperature measurement of a Kösters interferometer., Meas. Sci. Technol., 16, pp. 2201-2207

[46] Hamid R., Sendogdu D. and Erdogan C., “Application of Frequency Stabilized Lasers for Precision Length Measurements”, OSA Optics & Photonics Congress, İstanbul Türkiye, 15 Şubat 2011

[47] Hamid R., Sendogdu D. and Erdogan C., “Length Measurement with Nanometer Uncertainty using Laser Interferometer”, 1st Mediterranean Conference on Nano- Photonics - MediNano-1, Istanbul, Türkiye, 6-7 Ekim 2008

[48] Hamid R., Sendogdu D. and Erdogan C., “The Köster’s Interferometer for Long Gauge Block Length Measurements”, Conference Digest of Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Italy, 2006

[49] ANON., "MAHR GMBH ", Ticari Katalok, Almanya.

[50] ANON, "Mitutoyo", Ticari Katalog, Mitutoyo CO. Japonya

[51] ANON, "ULTRA PRÄZISION MESSZEUGE GMBH ", Ticari Katalok, P.O. Box 10 07 52 63705 Aschaffenburg / Almanya

[52] Ted Busch," Fundementals of Dimensional Metrology ", Delmar Publishers Inc., New York, 1989

[53] ANON, "Nikon", Web Sayfası, “http://www.nikonpositioning.com/theodolites.aspx”, 2010

[54] G2BF-030 Eğitim Dokümanı “Paralel Halka-Tampon Mastar Kalibrasyonu ve Belirsizlik Hesapları Eğitim Dökümanı”

[55] EURAMET/cg-10/v.02 Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing

[56] EURAMET/cg-6, Version 2.0 (03/2011) Guidance Publication, 2011 " Extent Of Calibration For Cylindrical Diameter Standards"

[57] Yandayan T. and Burdekin M., “In-Process Dimensional Measurement and Control of Workpiece Accuracy,” Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 10, 1423-1439 (1997)

[58] Yandayan T. and Burdekin M., “Development of a Laser Doppler System for In-Process Evaluation of Diameters on Computer Numerical Controlled Turning Machines,” Proc. I Mech E Part B, Journal of Eng. Manufact., Vol. 212, No:3, 183-194 (1998)

[59] Yandayan T. and Burdekin M., “Evaluation of a Laser Doppler Based Non-Contact In-Process Diameters Measuring System,” Proc. I Mech E Part B, Journal of Eng. Manufact., Vol 212, No:4, 307-323 (1998)

[60] Yandayan T. and Burdekin M., “In-Process Measurement Methods for Control of Workpiece Accuracy,” Proc. 32 Int. MATADOR Conference, UMIST, Manchester, UK, 621-626,1997

[61] Aksulu M., Ganioğlu O. ve Yandayan T., “Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri,” IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 184-195, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 25-26 Ekim 2001

[62] Yandayan T., Meral İ. ve Ganioğlu O., “Referans Halka-Tampon Mastar Kalibrasyonu ve Euromet 384 Nolu Proje Karşılaştırmaları Ölçüm Sonuçları,” III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 158-163, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 7-8 Ekim 1999

[63] Bülent Delibaş, Tanfer Yandayan, "Form ölçümleri ve önemi", Üretimde Kalite Dergisi, Aralık 2001, İstanbul

[64] G2BF-020 Eğitim Dökümanı “Form Ölçümleri ve Belirsizlik Hesapları”

[65] Delibaş B. ve Yandayan T., “Yeni form ölçüm parametreleri ve standartları,” IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 165-172, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 25-26 Ekim 2001

[66] ANON, " ZEISS", Web Sayfası,” http://www.zeiss.de”

[67] ANON, “TESA UPC measuring instrument for calibrating gauge blocks”: Kullanım Kılavuzu, TESA.-Brown&Sharp TESA AS.- Bugnan 38, CH-1020 Renens, İsviçre, 1996

[68] G2BY-010 Eğitim Dökümanı “Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri ve Belirsizlik Hesapları”

[69] ISO 4287:1997, Geometrical Product Specification, Surface Texture: Profile Method-Terms, definitions and surface texture parameters

[70] Bülent Özgür, Tanfer Yandayan " Çizgi Skalalı Ölçme Standartları Ve Ölçüm Yöntemleri ” İzmir 2010

[71] Yandayan T. and Ozgur B., “5 m-Measurement System for Traceable Measurements of Tapes and Rules,” Proc SPIE - Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements II, San Diego, California, USA, Vol. 5190, 419-430, August 4-6, Elsevier, Dublin 2003

[72] Ozgur B. ve Yandayan T. “Çizgi Skalalı Ölçme Standartları ve ölçüm yöntemleri” , VII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, İzmir, Makine Müh. Odası, 30 Ekim – 01 Kasım 2008

[73] ANON, "Leica", Ticari Katolog, Leica Geosystem AG CH-9435 Heerburgg, 1997

[74] Philip Kıssam, C.E."Optical Tooling for Manufacture and Alignment", McGraw-Hıll, New York, 1962

[75] ANON, "Optical Tooling Instruments and Accesorries Catalog", Ticari Katolog, Brunson Instrument Co. Kansas City

[76] Sim PJ. Angle standards and their calibration. In: Hewitt P.L. editor: Modern Techniques in Metrology. World Scientific. Singapore. 1984. pp 102-121

[77] G2BC-010 Eğitim Dokümanı “Açı Ölçümleri ve Açı Referansları Eğitim Dokümanı

[78] Yandayan T., Akgöz S. A. and Haitjema H., “A novel technique for calibration of polygon angles with non-integer subdivision of indexing table,” Precision Engineering: J. Int. Soc. Precision Engineering and Nanotechnology, 26, 412-424 (2002)

[79] Yandayan T., Akgöz S. A. and Haitjema H., “A new calibration method for polygons with pitch angle which does not match with the subdivision of the used indexing table,” Proc 3rd Int. Conference, euspen, , Eindhoven, The Netherlands, 481-484, May 26-30, 2002

[80] Yandayan T., “Application of the novel technique for calibration of 23-sided polygon with non-integer subdivision of indexing table,” IMEKO 8th Internatiobal Symposium on ISMQC, Erlangen, Germany, October 12-15, 2004

[81] Tanfer Yandayan, Nuray Karaböce, Bülent Özgür, Orhan Yaman, "Small Angle Generators for Angle Measurement", International Metrology Conference CAFMET 2010, Cairo, Egypt

[82] Yandayan T., Akgöz S.A. ve Karaböce N., “Hassas Poligonlarda Açı Kalibrasyonu ve Euromet 371 Nolu Proje Karşılaştırma Sonuçları,,” III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 94-101, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 7-8 Ekim 1999

[83] www.bipm.org

[84] G1ZF-010 Zaman ve Frekans Eğitim Notları

[85] Levine J “A review of time and frequency transfer methods” Metrologia 45 (2008) S162–S174

[86] Mills D L “Computer Network Time Synchronization: The Network Time Protocol”, Boca Raton, FL: CRC Pres, 2006

[87] D. W. Allan, M. A. Weiss, “Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite”, 34th Annual Frequency Control Symposium, pp. 334-346, May 1980

[88] EEE Std1139-1999 : IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology.-Random Instabilities

[89] Introduction to time and frequency metrology - Judah Levinea - JILA and Time and Frequency Division, NIST and the University of Colorado, Boulder, Colorado 80309

[90] M.A. Lombardi, L.M. Nelson, A.N. Novick, and V.S. Zhang, “Time and frequency measurements using the Global Positioning System,” Cal Lab: International Journal of Metrology, vol. 8, no.3, pp. 26–33, July-September 2001

[91] R. Gamidov, M. Çetintaş, ”Time Comparison of atomic clocks using counter and GPS system”, Proceedings of the 1999 Joint Meeting of The European Frequency and Time forum and The IEEE International Frequency Control Symposium, Vol.1, pp. 268-270, 1999

[92] The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), H.Preston-Thomas, Metrologia 27,3-10 (1990)

[93] Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990, Dec 1990, BIPM

[94] Bedford R.E, Bonnier G., Maas H., Pavese F., Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990,

[95] Techniques of Temperature Measurement, NPL Course Lecture Notes, 1996

[96] Quinn T. J., Temperature, Second Edition, 1983

[97] Nicholas, J.V., and White, D. R., Traceable Temperatures, John Wiley & Sons, 1994

[98] BS 1041:Part 5:1989, British Standard Temperature Measurement, Part 5, Guide to Selection and use of Radiation Pynometers

[99] Dewitt D.P., Nutter G.D. “Theory and Practice of Radiation Thermometry”, 1988 John Wiley & Sons Inc.

[100] A Guide to the Measurement of Humidity, The Institute of Measurement and Control, NPL (UK), 1996

[101] Water Wapor Measurements: Methods and Instrumentation, P. R. Wiederhold, 1997

[102] Operation and Maintenance Manual, Benchtop Two Pressure Humidity Generator Series 2500, Thunder Scientific

[103] Solid State Physics, Charles Kittel, John Wiley & Sons

[104] R. Hyland, A. Wexler, Formulations of the thermodynamic properties of saturated phases of H2O from 173.15 K to 473.15 K, Ashrae Transactions, 1983, Part 2A, pp 500-513

[105] Functional equations for the enhancement factors of CO_2-free moist air, L. Greenspan, J. of Res. of NBS – A. Physics and Chemistry, Vol 80A, No.1, Jan. – Feb. 1976, pp. 41-44

[106] Moist Gases: Thermodynamic Properties, V.A. Rabinovich, V.G. Beketov, 1995

[107] www.michell.co.uk “ Principles of Chilled Mirror”

[108] B. W Petley, Metrologia 31, 481, 1995

[109] L. Kowalski, The Physics Teacher, 96-99, 1986

[110] http://www.bipm.org/utils/en/pdf/24_CGPM Resolution_1.pdf

[111] Francis L. Hermach, Thermal Converters as AC-DC Transfer Standards for Current and Voltage Measurements at Audio Frequencies, J. Res. Natl. Bur. Stand. 48, 121-138, 1952

[112] F. J. Wilkins, “Theoretical analysis of the AC/DC transfer difference of the NPL multijunction thermal convertor over the frequency range DC to 100 kHz,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 21, pp. 334–340, Nov.1972

[113] M. Klonz and F. J. Wilkins, “Multijunction thermal converter with adjustable output voltagelcurrent characteristics,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-29 PP. 409-4123, Dec. 1980

[114] M. Klonz and T. Weimann, “Accurate thin-film multijunction thermal converter on a silicon chip,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 38, pp.335–337, Apr. 1989

[115] Petley, B.W., Electrical Units. Metrologia, vol. 31, 495-502, 1995

[116] Finnegan, T.F., Denenstein. A. and Langenberg, D.N., AC-Josephson Effect Determination of e/h: A Standard of Electrochemical Potential Based on Macroscopic Quantum Phase Coherence in Superconductors. Physical Reviews, vol. 4, no. 5, 1487-1522, 1971

[117] Josephson, B. D., Possible New Effects in Superconductive Tunneling. Physics Letters, vol. 1, no. 7, 251-253, 1962

[118] Anderson, P. W., How Josephson Discovered His Effect. Physics Today, 23-29, November 1970

[119] Popel, P. R., The Josephson Effect and Voltage Standards. Metrologia, vol. 29, 153-174, 1992

[120] Taylor, B. N., WITT, T.J., New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects. Metrologia, vol. 26, 47-62, 1989

[121] B. Jeanneret and S.P. Benz, Eur. Phys. J. Special Topics 172, 181–206, 2009

[122] M. L. Morgan, J.C. RILEY "Calibration of a Kelvin Varley Standard Divider", Trans. On Instrumentation of IRE, Vol. 1-9, Pp. 237-243; September, 1960

[123] "Corporation: Philosofy in Practice", Fluke Corporation, Mayıs1994

[124] TÜBİTAK UME Eğitim Dokümanı, AC Yüksek Gerilim Ölçümleri Eğitim Dokümanı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, 2012

[125] A. Merev, Ö. Kalenderli, The Construction of a DC High Voltage Precision Divider, Vol. 67, No.5, pp.741-745, 2009

[126] K. Gülnihar, A. Merev, S. Dedeoğlu, Yüksek Giriş Empedanslı AC ve DC Tepe Değer Voltmetre Tasarımı, 2. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, Bildiri Kitabı, pp.400-403, İzmir, 2011

[127] A. Merev, S. Dedeoğlu, 100 kilovolt SF6 Gaz Yalıtımlı Standart Kapasitör Yapımı, Yüksek Gerilim Ulusal Çalıştayı, Bildiri Kitabı, No.10-02, Kocaeli, 2007

[128] IEC 60060-1, High Voltage Test Techniques, Part 1: General Definition and Test Requirements, 2010

[129] IEC 60060-2, High Voltage Test Techniques Part 2: Measuring Systems, 2010

[130] Electrician, volume 1, pages 3,9,11, 1861

[131] CIPM 1988: Recommendation 2

[132] Jonathan M.Williams and Anthony Hartland, An automated cryogenic current comparator resistance ratio bridge, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol.40, No.2, April 1991

[133] Low Level Measurements, Keithley Instruments Inc., 6th edition, 2004

[134] Roman Honig, Practical Aspects of High Resistance Measurements, CEO Measurement International Europe

[135] Calibration Philosophy in Practice, Fluke Corporation, 2nd Edn., USA, May 1994

[136] P.Sipilä, R.Rajala, P.Kärhä, A.Manninen, E.Ikonen Calibration of current to voltage converters for radiometric applications at picoampere level, http://www.pmodwrc.ch/newrad2005/pdfabstracts/Newrad062.pdf

[137] Inoue T., Evaulation of Uncertainty due to Excess Heating by ann Adiabatic Line in Calorimetric Measurment of RF Power, Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2000

[138] Nick E.Fletcher, Stephen P.Giblin, Jonathan M.Williams and Keith J.Lines, New capability for generating and measuring small dc currents at NPL, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.56, No.2, April 2007

[139] Van den Brom H E, De la Court P and Rietveld G, Accurate subpicoampere current source based on a differentiating capacitor with software-controlled nonlinearity compensation, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.54, No.2, April 2005

[140] Final report on activities within the RTD Project G6RD-CT-2000-00210, Techniques and materials for the measurement of DC and AC conductivity of non-ferrous metals and alloys

[141] Van der Pauw, A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape, Philips Res. Rep., vol. 13, pp. 1–9, 1958

[142] J. Schurr et al, IEEE, Trans on Instrum. And Meas., 53, 3 , 2004

[143] Drake A E and Lynch A C, AC conductivity standards for the calibration of eddy-current conductivity meters, JPhys E:Sci. Instruments Vol 20 pp 137-139, 1987

[144] Kucera J, Volmer E., Schurr J, Precision Haddad Type Reference Resistor, CPEM Digest, 2008

[145] Nakamura Y, Fujiki H An analysis on the uncertainty of calculating the time constant of the quadrifilar reversed resistor, AIST Bulletin, Vol.3, No.3, April 2004

[146] Campbell, A. Proc. Roy. Soc. London, A79, 428, 1907

[147] Callegaro L, D'Elia V, Bohacek J, Four-Terminal-Pair Inductance Comparison Between INRIM and CTU, IEEE Trans. on Instrum and Meas., vol. 58, no. 1, January 2009 87

[148] Thompson A M, Lampard D G, Nature, 177, 888, 1956

[149] R. D. Cutkosky and L. H. Lee, Improved Ten-Picofarad Fused Silica Dielectric Capacitor, J. of Res. of the National Bureau of Standards - C., Vol. 69C, No. 3, July-Sept. 1965

[150] R. D. Cutkosky, Four-terminal-pair networks as precision admittance and impedance standards, Commun. Electron., vol. 70, pp. 19–22, Jan. 1964

[151] TÜBİTAK UME Eğitim Dokümanı, Güç ve Enerji Ölçümleri Eğitim Dokümanı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, 2009

[152] Hüseyin Çaycı, Özlem Yılmaz, Burak Ayhan, Tansu Kefeli, Mustafa Güneş, Erol Kazanç, A Power Measurement System For Power Frequencies, CPEM (Conference on Precision Electromagnetic Measurements), Turin, Italy, 9-14 Temmuz 2006

[153] TÜBİTAK UME Eğitim Dokümanı, Akım transformatörü Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, 2012

[154] TÜBİTAK UME Eğitim Dokümanı, Gerilim transformatörü Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, 2010

[155] Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 2) - Power Sensors and Instrumentation, Agilent AN 1449-2, USA, 2006

[156] Bailey, A.E., Microwave Measurements, Peter Peregrinus Ltd. UK, 1989

[157] Brunetti L., Oberto L., Sellone M., and Vremera T. E., Comparison Among Coaxial Microcalorimeter Models, IEEE Trans. On Instr. and Meas., Vol. 58, No. 4, pp. 1141-1145, 2009

[158] Judaschke R. and Rühaak J., Determination of the Correction Factor of Waveguide Microcalorimeters in the Millimeter-Wave Range, IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 4, 2009

[159] Mellouet B., Velasco L., and Achkar J., Fast Method Applied to the Measurement Power Standartds, Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2000

[160] Fantom A., Radio Frequency and Microwave Power Measurement, Peter Peregrinus Ltd. UK, 1990

[161] Wong K., Power Sensor Calibration and Uncertainties, Microwave Measurements Conference (ARFTG), 2002 60th ARFTG, 2002

[162] Wangsness R.K., Electromagnetic Fields, 2nd Edition, Wiley, 1986

[163] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_charge

[164] Keithley, Model 6514 System Electrometer Instruction Manual, Rev. D, 2003

[165] D.V. Sivukhin, General Course of Physics, Moscow Nauka, 1983

[166] Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Davij Jiles, Pub. Chapman and Hall, ISBN:0-412-38640-2.

[167] Elementary Solid State Physics, M.A. Omar, Addison-Wesley Pub. Company, ISBN: 0-201-05482-5

[168] K.S. Lion, Instrumentation in Scientific Research. Electrical Input Transducers, NewYork: McGraw-Hill, 1959

[169] F. Primdahl, The fluxgate magnetometer J. Phys. E: Sci. Instrum. Vol.1, 242, 1979

[170] C.M. Falco, I.K. Schuller, SQUIDS and their sensitivity for geophysical applications, SQUID applications to geophysics The Society of Exploration Geophysicist, 13, 1981

[171] Steven A. Macintyre, Magnetic Field Measurement CRC Press LLC, 1999

[172] http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_alan

[173] IEEE Std 1309-2005, IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antenna, from 9 kHz to 40 GHz, 2005

[174] EN55022:2006, Information technology equipment - Radio disturbance characteristics -Limits and methods of measurement

[175] EN55011:2007, Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - Electromagnetic disturbance characteristics - Limits and methods of measurement

[176] Directive 2004/108/EC : EMC Directive

[177] MIL-STD-461F-2007, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems And Equipment, Department of Defence USA.

[178] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Third edition, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons Inc. Publication, 2005

[179] IEEE C63.5:2006 - American National Standard for Electromagnetic Compatibility - Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control - Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)

[180] IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz, IEEE Std C95.3-2002

[181] EN61000-4-3, Testing and measurement techniques — Radiated radio-frequency, electromagnetic field immunity test

[182] Narda ELT-400, http://www.protelturkey.com/bulten/basin/narda/09_ELT%20400.ppt

[183] M.W. Howards, J. Adrews, RF Probe Calibration. Liberty Labs, Inc. Kimballton, http://www.liberty-labs.com

[184] K. Münter, R. Pape, M. Spitzer, J. Glimm, R. Bitzer. Traceable Calibration of Magnetic Field Transfer Sensors Up to 1GHz in a Radiated Standing Wave Pattern, http://www.narda-sts.de/pdf/fachartikel/24_traceable_calibration.pdf

[185] M.Glāser and M.Borys, Precision Mass Mesaurement, Rep. Prog. Phys, 72, 126101, pp 32, 2009

[186] G2KU-10 Kütle Eğitim Notları, TÜBİTAK UME

[187] The Third Periodic Verification of National Prototypes of The Kilogram (1988-1992), Metrologia, 31, 317-336, 1994

[188] M.Kochsiek, M.Glāser(eds), Comprehensive Mass Metrology

[189] G2KU-30 Temel Kütle ve Terazi Eğitim Notları, TÜBİTAK UME

[190] OIML-R 111 (2004) - Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3

[191] Bray, A., Barbato, G., Levi, R., Theory and Practice of Force Measurement, Academic Press, ISBN 0-12-128453-0, 1990

[192] Weiler, W., Handbuch der Physikalischen-Technischen Kraftmessung, Verlag, ISBN 3-528-08945-8, 1994

[193] Stefanescu, D.M., Handbook of force transducers, springer, ISBN 978-3-642-18295-2, 2011

[194] Aydemir, B., Pelit, E., Fank, S., Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dökümanı, G2KV-010, UME, 2008

[195] Aydemir, B, Pelit, E., Fank, S., Malzeme Test Makinesi Kalibrasyon Eğitim Dokümanı, G2KV-020, UME, 2008

[196] EURAMET/cg-04/v.01, Uncertainty of force measurement, 2010

[197] Modern Strain Gage Transducers, Epsilonics, Measuremen Group Inc., U.S.A, 1981-1984

[198] Bauschke, H., Kraftmeßtechnik, Deutsches Amt für Meßwesen und Warenprüfung, Berlin-Bereich Metrologie, DDR, 1968

[199] www.tecnotest.it

[200] www.hbm.com

[201] EN ISO 376, Metalic Materials - Calibration of Force-Proving Instruments Used for the Verification of the Uniaxial Testing Machine, 2011

[202] ASTM E74 – 06, Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines, 2006

[203] G2HY-20, Hacim Kapları ve Pistonlu Pipet-Büret Kalibrasyonu Eğitimi Notları, TÜBİTAK UME

[204] Spieweck; H. Bettin, Review: Solid and liquid density determination", Tm-Technisches Mesen, 59, 7/8, 1992

[205] G2HY-40, Referans Kütlelerin Hacim ve Yoğunluklarının Belirlenmesi Eğitimi Notları, TÜBİTAK UME

[206] F.W.Cuckow, ' A New Method of High Accuracy for The Calibration of Reference Standard Hydrometers' Journal of Society of Chemical Industry, 68, pp.44 – 49, 1949

[207] G2HY-30, Hidrometre Kalibrasyonu Eğitim Notları, TÜBİTAK UME

[208] EURAMET/cg-19 Version 2.1, Guidelines on The Determination of Uncertainty in Gravimetric Volume Calibration, 03/2012

[209] ISO 4787, Laboratory Glassware - Volumetric Glassware - Methods For Use and Testing of Capacity, 2010(E)

[210] A. Picard, R.S. Davis, M. Glaser And K Fujii, "Revised Formula For The Density Of Moist Air Metrologia, Vol. 45, P 149-145, 2008

[211] Tanaka, M., Et. Al; Recommended Table For The Density Of Water Between 0 °C And 40 °C Based On Recent Experimental Reports, Metrologia, 38, 301-309, 2001

[212] Batista, E., Paton R. The Selection Of Water Property Formulae For Volume And Flow Calibration, Metrologia, 44, 453-463, 2007

[213] OIML R 111 (2004) - Weights of Classes E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3

[214] ISO/TR 20461, Determination of Uncertainty for Volume Measurements Made Using The Gravimetric Method, 2000(E)

[215] HAMROCK, B. J. "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", 1st Edition McGraw-Hill Book Company, Inc, 1994

[216] GUNTHER, R. C. "Lubrication", 1st Edition, Bailey Brothers and Swinfen Ltd., 1972

[217] ASTM Designation D-445-97, IP Designation 71/84, Standart test method for Kinematic viscosity of Transparent and Opaque liquids (and the calculation of Dynamic viscosity)

[218] ISO 3104: 1994, Petroleum products-transparent and opaque liquids Determination of kinematik viscosity and calculation of dynamic viscosity

[219] DIN 51562-1: 1999, Determination of kinematik viscosity using the ubbelohde viscometer Part –1 Apparatus and measurement procedure

[220] ASTM-D 2161:10 Standard Practice for Conversion of Kinematic Viscosity to Saybolt Universal Viscocity or to Saybolt Furol Viscosity

[221] Yakıtlar ve Yağlar –Petrol Ofisi-1980

[222] ASTM Designation D-1200-94, Standart test method for viscosity by ford viscosity cup

[223] "D. Peschel, The State of the Art and Future Development of Metrology in the Field of Torque Measurement in Germany", Proc. 14th IMEKO World Congress, Tampere, Finland, Vol.3, 1997, pp. 65-71.Almanya, PTB

[224] EA-10/14: EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices Ausgabe 2000-07

[225] DKD-R 3-8, Calibration of static torque wrench calibration devices

[226] http://www.wilson-hardness.com/Resources/PressandPublications/HistoryofHardnessTesting.aspx

[227] EN ISO 6508-1:2005. Metallic Materials - Rockwell Hardness Test - Part1: Test Method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).

[228] Low, S.R., 2001, Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials, National Institutes of Standards and Technology Special Publication 960-5

[229] EN ISO 6506-1:2005, Metallic Materials - Brinell Hardness Test - Part1: Test Method

[230] EN ISO 6507-1:2005, Metallic Materials - Vickers Hardness Test - Part1: Test Method

[231] EN ISO 4545-1:2005, Metallic Materials – Knoop Hardness Test - Part1: Test Method

[232] EN ISO 868:2003, Plastic and Ebonite - Determination of Indentation Hardness by Means of Durometer (Shore Hardness).

[233] EN ISO 48, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic – Determination of Hardness (Hardness between 10 Irhd and 100 Irhd)

[234] EN ISO 6508-3:2005, Metallic Materials - Rockwell Hardness Test - Part3: Calibration of Reference Blocks (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

[235] EN ISO 6506-3:2005, Metallic Materials - Brinell Hardness Test-Part3: Calibration of Reference Blocks

[236] EN ISO 6507-3:2005,. Metallic Materials - Vickers Hardness Test - Part3: Calibration of Reference Blocks

[237] EN ISO 4545-3:2005, Metallic Materials - Knoop Hardness Test – Prat3: Calibration of Reference Blocks

[238] EN ISO ISO 6508-2:2005, Metallic Materials - Rockwell Hardness Test - Part2: Verification and Calibration of Testing Machines (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

[239] EN ISO 6506-2:2005, Metallic Materials - Brinell Hardness Test - Part2: Verification and Calibration of Testing Machines

[240] EN ISO 6507-2:2005, Metallic Materials - Vickers Hardness Test - Part2: Verification and Calibration of Testing Machines

[241] EN ISO 4545-2:2005, Metallic Materials - Knoop Hardness Test – Part2: Verification and Calibration of Testing Machines

[242] Buonanno G., Ficco G., Giovinco G., Molinar G. F., ed: Buonanno G., Molinar G. F., Ten Years of Experience in Modelling Pressure Balances in Liguid Media up to Few GPa, , Frosinone, Italy, p.17-19, 2007

[243] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/barfor.html

[244] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, The Institute of Measurement and Control 87 Gower Street, London, WC1E 6AA, p.6, 1998

[245] http://us.flukecal.com/products/pressure-calibration?geoip=1

[246] http://www.desgranges.com/html-gb/default.html

[247] Harland, Philip W., Pressure Gauge Handbook, Ametek US Gauge, ISBN:0-8247-8613-0

[248] http://empeo.de/index.php?page=product&info=385

[249] http://www.tradevv.com/chinasuppliers/lhpressuregauge_p_190d74/china-MANOMETER-DIAL-PRESSURE-GAUGE.html

[250] R. P. Benedict, Temperature, Pressure and Air Flow Measurement, ISBN 0-471-89383-8, p.322-334

[251] Karl Jousten, Handbook of Vacuum Technology, WILEY-VCH VERLAG GmbH&Co., 2008

[252] R.Kangi, B.Ongun and A.Elkatmis, The new UME primary standard for pressure generation in the range from 9 10−4 Pa to 103 Pa, Metrologia 41, 251–256, 2004

[253] Nigel S. Harris, Modern Vacuum Practice, McGraw-Hill Publishing, Bölüm 2, 1989

[254] K. Jousten, Traceability to SI units for vacuum measurement in industrial applications, Measurement, doi:10.1016/j.measurement.2011.10.036, 2011

[255] Handbook of Vacuum Science and Technology, D.M. Hoffman, B. Singh, J.H. Thomas, Academic Press, 1998

[256] K.W.T. Elliott and P.B. Clapham, NPL Report MOM 28, 1978

[257] Fen K., Man J.K.L., Anderson R., Bignell N., Pressure Measurement, Monograph 7: NMI Technology Transfer Series, Lindfield, p.156, Octocer 2006

[258] http://www.kistler.com/us_en-us/Technology_Piezoelectric/The-Piezoelectric-Effect.html

[259] P.A. Redhead, Vacuum, 53, 137-149, 1999

[260] Blevin WR, Steiner B., Redefinition ofthe candela and the lumen, Metrologia,11, 97–104, 1975

[261] Martin JE, Fox NP, Key PJ. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements. Metrologia, 21, 147–55, 1985

[262] Commision Internationale de l'Eclairage. The basis of physical photometry. CIE publication No:18.2, Vienna; 1983

[263] Zalewski EF, Geist J. Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration, Applied Optics, 19, 1214–6, 1980

[264] Zalewski EF, Geist J. Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes. Applied Optics, 19, 3795–9, 1980

[265] Sametoglu F. Influence of the spectral power distribution of a LED on the illuminance responsivity of a photometer, Optics and Lasers in Engineering, 46:643-7, 2008

[266] Samedov F, Durak M, Bazkir O. Filter-radiometer based realization of Candela and establishment of photometric scale at TÜBİTAK UME, Optics and Lasers in Engineering, 43:1252–6, 2005

[267] Samedov F, Bazkir O. Realization of photometric base unit of Candela traceable to cryogenic radiometer at TÜBİTAK UME, European Physical Journal of Applied Physics, 30:205–14, 2005

[268] Sametoglu F. New traceability chains in the photometric and radiometric measurements at the National Metrology Institute of Turkey, Optics and Lasers in Engineering, 45:36-42, 2007

[269] Commission Internationale de l'Eclairage, The measurement of luminous flux, CIE Publication 84, Vienna, 1989.

[270] Commission Internationale de l'Eclairage, The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions, CIE Publication 70, Vienna, 1987.

[271] Commission Internationale de l'Eclairage, The Photometry and Goniophotometry of Luminaires, CIE Publication 121, Vienna, 1996.

[272] Sametoglu F. Construction of two-axis Goniophotometer for measurement of spatial distribution of a light Source and calculation of luminous flux, Acta Physica Polonica A, 119:783-91, 2011

[273] Samedov F, Durak M. Realization of luminous flux unit of Lumen at TÜBİTAK UME, Optica Applicata, 34, 265-74, 2004

[274] Commission Internationale de l'Eclairage, Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters, CIE Publication 69, Vienna, 1987.

[275] Sametoglu F. Establishment of illuminance scale at TÜBİTAK UME with an accurately calibrated radiometer, Optical Review, 13, 326-38, 2006.

[276] Commision Internationale de l'Eclairage. CIE Collection in Photometry and Radiometry. CIE publication No:114, Vienna, 1994

[277] Ohno Y, Improvement photometric standards and calibration procedures at NIST, J Res Natl Inst Stand Technol., 102:323-331, 1997

[278] Fox NP, Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes. Metrologia, 32, 535-543, 1995/96

[279] Commission Internationale de l'Eclairage, Electrically Calibrated Thermal Detectors of Optical Radiation (Absolute Radiometers), CIE Publication 65, Vienna, 1985.

[280] Blevin WR, Brown WJ. Precise Measurement of the Stefan-Boltzmann Constant Metrologia, 7:15-29, 1971

[281] Martin JE, Quinn TJ, Chu B. Further Measurements of Thermodynamic Temperature Using a Total Radiation Thermometer: the Range –130 °C to +60 °C. Metrologia, 25, 107-112, 1988

[282] Bazkir O, Ugur S, Samedov F, Esendemir A. High-accuracy optical power measurements by using electrical - substitution cryogenic radiometer, Optical Engineering, 44, 64011-6, 2005

[283] Bazkır O, Samedov F. Charecterization of silicon photodiode based trap detectors and establishment of spectral responsivity scale, Optics and Lasers in Engineering, 43:131-41, 2005

[284] Commission Internationale de l'Eclairage, Determination of the Spectral Responsivity of Optical Radiation Detectors, CIE Publication 64, Vienna, 1984

[285] Bazkir O, Celikel O, Samedov F. Realization of relative responsivity scale with the elctrically calibrated pyroelectric radiometer, Optics & Laser Technology, 39, 189-95, 2007

[286] Skerovic V, Zarubica V, Zekovic L, Belca I, Aleksic M. Development of the method for realization of spectral irradiance scale featuring system of spectral comparisons. Journal of Instrumentation, 5:1-10, 2010

[287] Kubarsepp T, Karha P, Manoocheri F, Nevas S, Ylianttila L, Ikonen E. Spectral irradiance measurements of tungsten lamps with fitler radiometers in the spectral range 290 nm to 900 nm. Metrologia, 37, 305-312, 2000

[288] NBS Measurement Services: Spectral Irradiance Calibrations-Center for Radiation Research,1987

[289] J.E.Hardy, J.O.Hylton, T.E.McKnight, C.J.Remenyik, F.R.Ruppel, Flow Measurements Methods and Applications, John Wiley&Sons,Inc.,1999

[290] H.Kaykisizli, “Bell Prover İle Gaz Sayaçları Kalibrasyon Talimatı”, TÜBİTAK UME, 2005

[291] J. D. Wright, A. N. Johnson, and M. R. Moldover, "Design and Uncertainty Analysis for a PVTt Gas Flow Standard," NIST J. of Res., 108, 1, pp. 21-47, 2003

[292] Kullanma Kılavuzu “Bios Gas Flow Bench “, Bios International Corporation, 2009

[293] Roger C. Baker, Flow Measurement Handbook, 2000

[294] H.E. Albrecht et al, Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Tecniques, 2003

[295] F.Durst et al, Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, 1976

[296] Richard W.Johnson, The Handbook of Fuid Dynamics, 1998

[297] Leo L. Beranek, “Acoustical Measurements”, Acoustical Society of America, 1988

[298] IEC 61094-2 “Electroacoustics - Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique”, International Electrotechnical Comission, Geneva, 2009

[299] “Microphone Handbook”, vol.1, BE 1447-11, Brüel & Kjaer, 1996

[300] IEC 61094-1 “Measurement microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones”, International Electrotechnical Comission, Geneva, 2000

[301] Erling Frederiksen and Jørgen I.Christensen “Pressure Reciprocity Calibration – Instrumentation, Results and Uncertainty”, Technical Review, Brüel & Kjaer, No.1, 1998

[302] E.Sadıkoğlu, E.Bilgiç, B.Karaböce, “Laser Pistonphone Based On Self-Mixing Interferometry”, Applied Acoustics, vol.38, pp.235-242, 2004

[303] Brüel & Kjaer web-sayfası, www.bksv.com

[304] IEC 61161, Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0.5 MHz to 25 MHz, 1998

[305] Beissner, K., Primary measurement of ultrasonic power and dissemination of ultrasonic power reference values by means of standard transducers, Metrologia, 36, pp. 313-320, 1999

[306] Hekkenberg, RT., Beissner, K. and Zeqiri, B., Therapy-level ultrasonic power measurement, BCR Information, Reference Materials, Project report, 2000

[307] Karaböce B., Sadıkoğlu E. and Bilgiç E., Realization of National Ultrasonic Power Standard, Internoise 2005, Proceedings of INTER-NOISE 2005 Conference, Rio/Brasil 7-10 August 2005

[308] Karaböce, B., Sadıkoğlu, E., Bilgiç, E., Kırbaş, C., Turan, A.İ., Mehedin Arifoviç Comparison of voltage measurement techniques in radiation conductance calculations of ultrasonic power transducer, Inter-noise 2007 Kongresi Bildiriler kitabı, İstanbul, Turkey, 28-31 August 2007.

[309] ISO 16063, Titreşim ve Şok Dönüştürücülerinin Kalibrasyon Metotları

[310] E.Bigiç, E.Sadıkhov, B.Karaböce, Titreşim Standardının Oluşturulması: Lazer Enterferometre Tekniği, 2.Ulusal Akustik ve Gürültü Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 9-15, Antalya, Ekim 1996

[311] E.Sadıkhov, E.Bilgiç, Ulusal Titreşim Ölçeğinin Oluşturulması, 2.Ulusal Ölçümbilim Kongresi bildiriler Kitabı, s. 425-429, Eskişehir, Ekim 1997

[312] E.Bilgiç, E.Sadıkhov, B.Karaböce, TÜBİTAK UME ve PTB Arasında Titreşim Alanında Gerçekleştirilen Uluslararası Karşılaştırma, 4.Ulusal Akustik Kongresi Bildiriler kitabı, s.251-257, Kaş-ANTALYA, 1998

[313] E.Sadıkoğlu, E.Bilgiç, B.Karaböce, Realization and Dissemination of Linear Acceleration Unit at TÜBİTAK UME, Proceedings, Fifth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, Ancona, İtalya, 2002

[314] Enver Sadıkoğlu, Eyüp Bilgiç, Baki Karaböce, Cafer Kırbaş, Ali İzzet Turan, Overview of methods for calibration of vibration pick-ups, Inter-noise 2007 Kongresi Bildiriler Kitabı, 28-31 Ağustos 2007

[315] Bilgiç E., Sadıkoğlu E., Karaböce B., Kırbaş C., Turan A. İ., “Primary accelerometer calibration in TÜBİTAK UME by sine approximation method”, IMEKO World Congress Fundamentals and Applied Metrology, Lisbon Portugal, 1-6 Eylül 2009

[316] ISO 8041, İnsan Vücudunun Titreşime Tepkisi – Ölçüm Cihazları

[317] M. Jean Perrin, Brownian Movement and Molecular Reality, Baskı: Norteastern Universitesi, “Annales De Chimie et de Physique" 8nd Serisinden Fredric Soddy tarafından çeviri, Eylül 1909.

[318] Terrien J., Metrologia, 8(1), 32-36, 1972

[319] Peter J. Mohr, Barry N.Taylor, and David B. Newell, Reviews of Modern Physics, Volume, April-June 2008

[320] Prichard, E. and Barwick, V., Quality Assurance in Analytical Chemistry, John Wiley & Sons, 2007

[321] Ellison, S.L.R., King, B., Rosslein, M., Salit, M. and Williams, A., EURACHEM/CITAC Guide Traceability in Chemical Measurement, http://www.eurachem.org, 2003

[322] Ellison, S.L.R. B and Williams, A. EURACHEM/CITAC Guide Quantifying Uncerainty in Analytical Measurement”, Third Edition, http://www.eurachem.org, 2012

[323] Ph. Hubert, JJ. N´Guyen-Huu, B. Boulanger, E. Chapuzet, P. Chiap, N. Cohen, PA. Compagnon, W. Dewe, M. Feinberg, M. Lallier, M. Laurentie, N. Mercier, G. Muzard, C. Nivet, L. Valat, Validation of quantitative analytical procedures, Harmonization of approaches, STP Pharma Pratiques, volume 13, 101-138, 2003

[324] A. Gustavo González, M. Ángeles Herrador, Agustín G. Asuero, Practical digest for evaluating the uncertainty of analytical assays from validation data according to the LGC/VAM protocol, Talanta, Volume 65, Issue 4, Pages 1022-1030, 28 February 2005

[325] ISO, Guide to The Expression of Uncertainity in Measurement, prepared by ISO Technical Advisor Group 4 (TAG 4), Working Group 3 (TAG 3), October 1993

[326] UKAS, The Expression of Uncertainity in Testing, 2000

[327] NIST Technical Note 1297, Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainity of NIST Measurement Results, 1994

[328] Measurement Uncertainty: Approaches to the Evaluation of Uncertainties with Recovery, Vicki J. Barwick and Stephen L. R. Ellison, Analyst, 124, 981-990, 1999

[329] V. J. Barwick and S. L. R. Ellison, Evaluating uncertainties associated with recovery, VAM Technical Report, LGC/VAM/1998/052, 1998

[330] ISO Guide 33, Uses of certified reference materials, 2000

[331] ISO Guide 35, Reference materials- General and statistical principles for certification, 2006

[332] Validation of Compendial Methods, US Pharmacopeia, http://www.pharmacopeia.cn/v29240/usp29nf24s0_c1225.html

[333] US EPA, Guidance for methods development and methods validation for the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Program, Washington, 1995

[334] International Conference on Harmonization (ICH) of Technical Requirements for the Registration of Pharmaceuticals for Human Use, Text on validation of analytical procedures, ICH-Q2A, Geneva, 1994

[335] International Conference on Harmonization (ICH) of Technical Requirements for the Registration of Pharmaceuticals for Human Use, Validation of analytical procedures, ICH-Q2A, Geneva, 1995

[336] 13. International Conference on Harmonization (ICH) of Technical Requirements for the Registration of Pharmaceuticals for Human Use, Validation of analytical procedures: Methodology, ICH-Q2B, Geneva, 1996

[337] ISO 5725-6, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 6: Use in practice of accuracy values, 1994

[338] EURACHEM Guide, Fitness for Purpose of Analytical Methods, 1998 (http://www.eurachem.nl/images/eurachem/Fitnessforpurpose.pdf)

[339] Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 5, pp 835-855, 2002

DİZİN

A

AC Direnç 223, 224, 225, 226
AC-DC Transfer Farkı 177, 178, 198, 199, 200
AC-DC Transfer Standart 174, 184, 197
Açı 127, 128, 129, 130
Açı Mastar Blokları 129, 130
Adım Mikrometresi 118, 120
AFRIMETS 25, 35
Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı (CGPM) .5, 17, 23, 46, 133, 134, 170, 172, 299, 476
Akım 169, 171, 172, 173, 177, 179, 182, 420
Akım Transformatörü 247, 249, 250
Akım Yoğunluğu 48, 186, 275
Akışkanlar Mekaniği 426
Akreditasyon 28, 30, 43
Akreditasyon İşbirliği Kurumu (SADCA) 30
Akustik 448, 453
Akustik Kalibratörü 454, 456
Akustik Transfer Empedansı 451
Algılama Sınırı 482, 484
Allan Variance İstatistiği 79, 80
Amerika Kıtaları Metroloji Sistemi 26
Amerika Kıtası Akreditasyon İşbirliği (IAAC) 29
Amper 23, 46, 47, 169, 170, 171, 172, 180, 181, 208, 211, 255, 264, 266, 267, 269, 367, 420
Amper Yasası 169, 211
Analist 478, 479, 481, 491
ANDIMET 26
APMP 25
Arşın 7, 8
Arşimet İlkesi 318, 321, 322
Arşiv Kilogram 4, 297, 298
Arşiv Metre 4
Asya Pasifik Laboratuvar Akreditasyon İşbirliği (APLAC) ... 30
Asya Pasifik Metroloji Programı (APMP) 25
Atmosfer 368, 369, 385
Atmosfer Basıncı 368, 369, 371, 372, 376, 385
Atomik Saat 76, 79, 81, 82, 135, 137, 138
Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) 29, 30, 43, 44
Avrupa Analitik Kimya Laboratuvarları Birliği (EURACHEM) 41, 487
Avrupa Metroloji Araştırma Programı (EMRP) 26
Avrupa Metroloji Enstitüleri Birliği (EURAMET) 25, 41
Ayar (Ölçüm Sisteminin Ayarı) 18
Aydınlık Düzeyi 394, 396, 401, 403, 404, 405, 406

B

Bağıl Basınç 369, 372
Bağıl Hata 58
Bağıl Nem 160, 161, 162, 163, 164, 165, 167
Bağıl Standart Sapma 347, 483
Bağlaşım 451, 452, 456
Bar 51, 368, 385
Basınç 48, 51, 367, 368, 373, 375
Basınç Dönüştürücü 373, 380, 381, 382, 383, 384
Basınç Ölçer 370, 371, 372, 373, 376, 380, 384
Batman 6, 8
Bekerel 16, 49
Bell Prover 427
Bessel Fonksiyonu Yöntemi 466, 468, 469
BIPM .5, 7, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 33, 35, 41, 70, 79, 80, 134, 135, 188, 298, 299, 300, 301, 305, 477, 487
Bilimsel Metroloji 3, 23, 24, 28, 31, 39, 40
Birim Sembolü 52, 300, 319, 320, 330
Boyle-Mariotte Kanunu 387
Bölgesel Akreditasyon Organizasyonları 29
Bölgesel Metroloji Organizasyonları 24, 26
Büyüklük 16

C

Cam Cetvel 118, 119, 122
CAMET 26
CARIMET 26
CCAUV 23
CCEM 23
CCL 23
CCM 23
CCPR 23, 393
CCQM 23
CCRI 23
CCT 23
CCTF 23
CCU 23
Celsius Derece 49
CEMACMET 25
CGPM 5, 17, 23, 27, 46, 48, 133, 172, 299, 318, 367, 393
CIPM 4, 23, 26, 27, 41, 70, 181, 182, 189, 298, 326, 386, 393, 448, 457, 463, 476, 487
CIPM MRA 25, 26, 27, 41, 42
CMC 27, 41
CMM 73, 85, 100, 110, 111, 112, 113, 114, 118, 120
Comb Sistemi 73, 82, 90
COOMET 25, 35
Coulomb 48, 169, 264, 278, 279

Ç

Çalışma Aralığı 482, 485
Çelik Cetvel 118, 119
Çiy-Noktası Sıcaklığı 160, 161, 162, 164
Çizgi Skalası 118, 120, 122
Çok Taraflı Anlaşma (MLA) 29, 30, 43, 44

D

DC Gerilim Bölücü 193

DC Gerilim Standardı 185, 186, 191, 192
Debi 426, 427, 428, 429, 431, 432, 433
Hacimsel Debi 427, 431, 433, 434
Kütlesel Debi 427, 431, 432, 433, 437
Deneysel Standart Sapma 59, 60, 63, 68
Derinlik Standardı..... 117
Dikdörtgen Dağılım 66, 69, 347, 490
Dinamik Genleşme Sistemi 386
Dinamik Viskozite..... 49, 327, 329, 330, 336
Direnç 48, 208, 209, 211, 223, 224, 239
Dirhem 4, 8
Dirhem-i aşarî 4
Divan-ı Lügati't Türk 6, 8
Diyamanyetizma 271
Doğrulama 18
Doğrulamanın Tanınması..... 22
Doğrulamaya Tabi Ölçü Aleti..... 22
Doğruluk 482
Doğrusal Aralık 482, 485, 492
Donma Noktası 147, 149, 393, 411
Döner Disk Sistemi (DDS).....440, 442
Döner Rotor Ölçer (SRG).....386, 389
Döner Tabla 108, 109, 126, 130, 132
Duyarlılık.....258, 482, 483
Duyma Eşiği..... 448
Düzeltilmemiş Sonuç..... 56, 57
Düzeltilmiş Sonuç..... 56
Düzeltme..... 57, 68, 311, 424, 425
Düzeltme Faktörü..... 57
Düzlem Açısı..... 48
Düzlemsellik İnterferometresi 94

E

EA29, 30, 43, 44, 68, 69
EAMET 25
Elektrik Akımı..... 47
Elektrik Geçirgenlik 50, 280
Elektrik Yükü.....48, 264, 265, 374
Elektriksel Güç.....245, 246, 247
Elektriksel İletkenlik..... 48
Elektriksel Transfer Empedansı..... 451
Elektromanyetik Debimetre 434, 435, 436
Elektromotor Kuvveti 48
Emisivite 155, 157
Empedans Başlığı..... 473
Endüstriyel Metroloji.....3, 28, 426
Enerji 48
Ergime Noktası 149
EURACHEM.....41, 487
EURAMET 25, 26, 29, 35, 41, 103
Kalite Teknik Komitesi..... 41
Evrensellik 68

F

Farad 48, 170, 222, 235
Fark Basıncı.....369, 372, 378
Ferromanyetizma 271
Flick Standardı 108, 110, 114
Form Ölçüm Cihazı..... 103, 108, 109
Form Parametreleri.....104, 110
Fotometre 395, 396, 397, 399, 405, 408
Frekans ... 48, 73, 74, 75, 76, 79, 80, 88, 133, 134, 135, 137, 138, 140, 141, 142

G

Gaussmetre..... 270, 273, 274
Gaz Akışı.....427
Gaz Hızı 440
Gaz Sayacı 32, 431
Geçerli Kılma 19, 479, 480, 481, 482, 485, 486, 487, 490, 492, 493
Gerçek Değere Yakınlık.....482
Gerçeklik 482, 492
Geri Kazanım..... 482, 486, 491
Gerilim Transformatörü 203, 247, 252, 253, 254, 255
Girişim Deseni 466, 467
Girişim Saçaklarını Sayma Yöntemi.....466
Gram 4, 8, 169, 170, 300
Gray.....49
GUM 61, 68, 69
Güvenilirlik Seviyesi..... 18, 61

H

Habba.....8
Hacim 48, 50, 318, 319, 320, 321, 322, 325, 387
Hacim Kapları..... 325, 326, 490
Halka Mastar 99, 101, 102, 103, 114
Hatt-ı Humayun.....4
Hava Hız Ölçer 438, 446
Hava Hızı..... 438, 442, 445
Henry.....49
Hertz.....48
Hız.....48, 51, 463
Hız Seviyesi.....464
Hidrometre 323, 324
Hüsamettin Yalhı 7

I

IAF.....29, 35, 44
ILAC 28, 29, 30, 35, 44
ILAC MRA.....28, 44
IMEKO 35, 41
Isıl Çevirici 174, 175, 176, 177, 178, 179, 198, 199, 200
Çok-Eklemli Isıl Çevirici..... 176, 177, 197, 248
Elektronik Yapılı Isıl Çevirici 177, 197
Tek-Eklemli Isıl Çevirici 175, 176, 177, 196, 197
Isıl Dönüştürücü.....461
Isılçift 149, 151, 152, 153, 154, 155, 175, 176, 177, 196, 197, 198, 256, 257, 391
Isılçift Vakum Ölçer.....391
Işık Akısı..... 394, 395, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 407
Işık Şiddeti..... 16, 47, 91, 367, 393, 395, 396, 397, 398, 401, 404, 405, 408, 411, 468

Işıma 394, 423, 424, 425
Işıma Akısı 48
Işınım Düzeyi 394, 419, 420, 421, 422, 423, 425
Işınım Sıcaklık 145, 155
ITS-90 ..... 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 157

İ

İletkenlik 219
AC İletkenlik 222
DC İletkenlik 219, 220
İndeks Tabla 129, 130, 131
İndüktans 49, 227, 228, 230, 231, 232, 233
İnterferometre 70, 71, 78, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 103, 108, 114, 119, 120, 122, 131, 371, 465, 466, 468, 469, 470, 471
İrdeb 6
İvme 48, 311, 463, 464
İvme Ölçer 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475
İvme Seviyesi 464, 467, 475
İyonizasyon Vakum Ölçer 386, 390
İzlenebilirlik 3, 19, 28, 85, 134, 150, 158, 168, 231, 241, 299, 350, 492
İzlenebilirlik Zinciri 3, 19, 72, 79, 85, 109, 118, 128, 158, 159, 168, 231, 241, 256, 257, 296, 301, 305, 311, 318, 319, 325, 338, 343, 350, 419, 420, 452, 456, 481

J

Josephson Etkisi 181, 182, 186, 188, 189, 191
Josephson Gerilim Standardı .. 171, 173, 182, 186, 189, 190, 191
Josephson Gerilimi 189
Josephson Sabiti 181, 189
Joule 48, 50, 170, 181, 410

K

Kalibrasyon 18
Dahili kalibrasyon 18
Kalibrasyon Faktörü 468
Kalibrasyon ve Ölçüm Yetenekleri (CMC) 27, 41
Kandela 23, 46, 47, 367, 393, 394, 395, 396, 397
Kantar 6, 8
Kanunname-i İhtisab-ı Bursa 6
Kapasitans 48, 235, 236, 237, 238, 239, 241
Kapasitans Diyafram Ölçer (CDG) 386, 389
Kapsam Aralığı 18, 61
Kapsam Faktörü 18, 51, 61, 67, 68, 69, 488, 489
Kapsam Olasılığı 18, 61
Kararlı Lazer 70, 73, 75, 77, 80, 82, 88, 89, 90, 118
Karşılaştırma Kalibrasyonu 454, 465, 473, 474
Karşılıklı Kabul Düzenlemesi (MAA) 34
Karşılıklı Tanıma Anlaşması (MRA) 44
Karşılıklı Tanıma Düzenlemesi (MRA) 27, 28, 41, 480
Karşılıklık Yöntemi 449, 450, 452, 465, 466
Katal 49
Katı Açı 48
Kelvin..... 16, 23, 46, 47, 49, 50, 52, 146, 160, 161, 169, 193, 194, 367, 477
Kendi İçinde Tutarlılık 68
Kesinlik 46, 59, 482, 483, 484, 491
Kızgın Tel Anemometresi 444, 445
Kile 6, 8
Kilogram 4, 5, 7, 8, 16, 23, 46, 47, 49, 50, 170, 172, 208, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 305, 308, 319, 367, 368
Kilogram Prototipi 19, 47, 172, 297, 298, 299, 300, 301
Kinematik Viskozite 329, 330, 334, 335, 336, 337
Kirat 8
Klinometre 132
Kolimatör 122, 123, 124, 126
Kontak Sıcaklık 145, 146, 149, 151, 155
Konvansiyonel Kütle 302
Kuantum Hall Direnci 209, 211, 231, 239
Kuantum Hall Etkisi 210, 239
Kuantum Hall Standardı 173, 224, 239
Kumpas 98, 99
Kuvvet 48, 100, 309, 311, 314, 315, 316
Kuvvet Dönüştürücüleri 316
Kuvvet Ölçme Cihazları 315, 316, 317
Kuvvet Standardı Makineleri 314, 315
Kübit 3
Kütle 5, 16, 47, 50, 51, 160, 296, 297, 299, 300, 301, 302, 306
Kütle Konsantrasyonu 48
Kütle Prototipi 7, 298, 299
Kütle Standardı 296, 297, 298, 301, 302, 304
Kütle Yoğunluğu 48
Kütlesel Coriolis Debimetreler 435, 437

L

Lazer Dopler Anemometre (LDA) 438, 440, 441, 442
Lazer İnterferometre 82, 93, 103, 108, 114, 119, 120, 465, 466, 469
Lazer Pistonfon 452
Lidre 8
Litra 8
Litre 50, 52, 319
Lodra 6, 8
Lumen 49
Lüks 49, 394

M

Madde Miktarı 16, 19, 46, 47, 367, 476, 477
Madde Miktarı Konsantrasyonu 48
MAGMET 25
Manometre 370, 371, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 386, 391
Manyetik Akı 48, 227, 267, 268, 270, 276
Manyetik Akı Yoğunluğu 49, 266, 267, 270
Manyetik Alan 266, 267, 269, 270, 272
Manyetik Alan Şiddeti 48, 266, 267, 272, 273
Manyetik Geçirgenlik 50, 267, 269, 270, 298
Manyetik Moment 268, 269, 270, 271, 272, 277
Manyetometre 272, 275, 277

Mastar Blok 70, 73, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 98, 99, 100, 114, 129, 130
Mastar Blok İnterferometre 88, 89, 90
Menn 6
Mesahat ve Evzan ve Ekyal-i Cedideye Dair Kanunname ... 8
Metodun Geçerli Kılınması Raporu 486
Metre . 4, 5, 6, 7, 8, 16, 23, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 70, 82, 83, 84, 87, 88, 101, 102, 103, 127, 129, 170, 208, 267, 297, 298, 367, 429, 440, 463
Metre Konvansiyonu 5, 7, 23, 24, 41, 46, 298, 299
Metre Sistemi 8
Metroloji ... 3, 6, 8, 16, 21, 22, 25, 26, 33, 39, 40, 42, 45, 215, 229, 232, 237, 238, 391, 411, 412, 416, 476
Metroloji Bilirkişiliği 21
Metroloji Güvencesi 21
Metroloji Kanunu 22
Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü 33, 39, 42
Metrolojik Denetim 21
Metron 3, 4
Mıknatıslanma 268, 269, 270, 271
Michelson İnterferometresi 70, 89, 92, 371, 466, 469
Mihengir 98, 99, 100
Mikrofon 448, 449, 450, 451, 452, 454, 456
  Kapasitif Mikrofon 448, 449, 450
  Mikrofon Hassasiyeti 452, 456, 464
Mikrokalorimetre 256, 257
Mikrometre 98, 120
Miralay Hüsnü Bey 5
Miskal 8
MLA 29, 30, 43, 44
Model Fonksiyon 18, 62
Modülasyon Faz Genliği 472
Mol 16, 23, 46, 47, 50, 367, 476, 477
Mûd 6
Mutabakat Zaptı 25, 29
Mutlak Basınç 369, 371, 372, 373, 376
Müdd 6

N

Narh Defteri 8
Negatif Basınç 369, 377
Nem Kaynakları
  Doymuş Tuz Eriyikleri 162, 163, 165
  İki-Akış Nem Kaynakları 163, 164
  İki-Basınç Nem Kaynakları 160, 161, 162, 163
  İki-Sıcaklık Nem Kaynakları 162, 163, 164
  İklimlendirme Kabini 163, 165
Nem Ölçer 160, 162, 163, 165
  Direnç Sensörlü Bağıl Nem Ölçer 166
  Empedans Sensörlü Bağıl Nem Ölçer 165
  Islak/Kuru-Hazneli Nem Ölçer 165, 167
  Mekanik Nem Ölçer 165, 166
  Psikometre 165, 167
Newton 48, 278, 296, 309, 310, 311, 313, 327
Nivo 122, 124
NORAMET 26
Normal Dağılım 63, 64, 65, 68, 69, 490

O

Ohm 48, 170, 208, 209, 223
OIML 33, 34, 35, 119, 302, 303, 304, 434
Okka 6, 8
Onaylanmış Kuruluş 22
Onaylanmış Tip 22
Ondalık Metrik Sistem 4, 8
Optik Güç 410, 411, 412, 414, 419, 420
Optik Kafes Yöntemi 466
Otokolimatör 125, 130, 131

Ö

Ölçme İşlemi 56
Ölçü Aletinin Denetlenmesi 22
Ölçü Aletinin Doğrulanması 21
Ölçü Aletinin Uygunluk Değerlendirmesi 21
Ölçü Aletlerinin Yasal Kontrolü 21
Ölçü Saati 98, 100
Ölçüler Kanunu 4, 6, 299
Ölçüler ve Ağırlıklar Kanunu 4, 7
Ölçüm 16, 55
Ölçüm Aralığı 482, 485
Ölçüm Belirsizliği 17, 18, 19, 53, 54, 56, 61, 62, 68, 103, 151, 487, 488, 489
  A Tipi Ölçüm Belirsizliği Değerlendirmesi ... 17, 18, 61, 62, 64, 67, 490
  B Tipi Ölçüm Belirsizliği Değerlendirmesi ... 18, 61, 64, 67, 490
  Bağıl Standart Ölçüm Belirsizliği 18, 488
  Belirsizlik Bütçesi 18, 307, 480, 481, 489
  Belirsizlik Kaynakları 93, 326, 488, 491
  Bileşik Standart Ölçüm Belirsizliği 18, 61, 67, 488, 489, 490
  Genişletilmiş Ölçüm Belirsizliği... 18, 67, 68, 69, 487, 488, 489, 491
  Standart Ölçüm Belirsizliği 17, 18, 61, 62, 67, 68, 69, 488, 489, 490, 491
Ölçüm Bilimi 3, 16, 31
Ölçüm Birimi 16
Ölçüm Büyüklüğü 23, 26, 27
Ölçüm Doğruluğu 17, 58, 59, 478, 482
Ölçüm Hatası 17, 57
Ölçüm Kesinliği 17, 58, 59, 60, 483
Ölçüm Metodu 17, 479, 484, 493, 495
Ölçüm Mevzuatı 7
Ölçüm Modeli 17, 18, 19, 61, 62, 67, 489, 491
Ölçüm Modelinin Çıktı Büyüklüğü 18, 61, 62, 67, 68
Ölçüm Modelinin Girdi Büyüklüğü 18, 19, 61, 62, 67, 68
Ölçüm Prosedürü 17, 18, 19, 55, 60, 483, 484, 488, 492
Ölçüm Sonucu 56
Ölçüm Sonuçlarının Raporlanması 68
Ölçüm Standardı 17, 19, 58
  Birincil Seviye Ölçüm Standardı 19, 184, 440
  Çalışma Ölçüm Standardı 20
  İkincil Seviye Ölçüm Standardı 20, 184
  Referans Ölçüm Standardı 20, 149
  Taşınabilir Ölçüm Standardı 20
  Transfer Ölçüm Standardı 20
  Ulusal Ölçüm Standardı 19

Uluslararası Ölçüm Standardı 19
Ölçüm Standardının Muhafazası 3, 20, 23, 25, 26, 41, 296
Ölçüm Tekrarlanabilirliği .17, 59, 60, 326, 344, 478, 482, 483, 485, 491
Ölçümün Sistematik Hatası 56, 57, 58, 68, 346
Ölçümün Tekrar Gerçekleştirilebilirliği 59, 60, 63, 482, 483
Ön Muayene 21
Özgüllük 482, 484

P

Paramanyetizma 271
Parıltı 394, 407, 408
Parlaklık 48, 49
Pascal 48, 160, 161, 367, 385
Pervaneli Anemometre 445
Pirani Vakum Ölçer 391
Pistonfon 454
Pistonlu Basınç Ölçer 370, 371, 372
Pitot Tüp 438, 440, 442, 443
Piyasa Gözetimi ve Denetimi 22, 36, 37, 38, 42
Platin Direnç Termometre 146, 151
PLL 77
Poligon 129, 130, 131
Pürüzlülük Parametresi 115, 116
Pürüzlülük Standardı 117
PVTt sistemi 427, 428

R

Radyan 16, 48, 50, 127
Radyasyon Kuvvet Terazisi 457
Radyasyon Termometresi 147, 148, 155, 157, 158
Radyasyon Yayınım 462
Radyometre 147, 158, 395, 396, 397, 398, 399, 405, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 419, 420, 422, 423, 425
Rastgele Ölçüm Hatası 17, 58, 482
Ratl Rûmi 8
Rayleigh Disk 448, 449
Referans Malzeme 20, 62, 478, 479, 494
Referans Silindir 108
Rezonans Frekans 137, 458, 461
RF Güç 256
Rotolo 6
Royal Cubit 3, 4
Rutubet İçeriği 162
Rutubet Ölçer 160, 162, 166
Rüzgar Tüneli 438, 439, 440

S

SADCMET/MEL 25
Sağlamlık 482, 485
Saniye 23, 46, 47, 49, 50, 74, 75, 133, 134, 135, 169, 170, 208, 264, 268, 276, 330, 337, 358, 360, 362, 367, 440, 461, 463
Seçicilik 482, 484
Sertifikalı Referans Malzeme (SRM) . 20, 479, 480, 486, 490, 494
Sertlik348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 357, 359, 360, 361, 363, 364, 366
Brinell Sertliği351, 352, 356, 357, 358, 359, 364, 365, 366
IRHD Sertliği 351, 352, 364
Knoop Sertliği 349, 351, 352, 361, 362, 366
Mohs Sertliği 348, 351
Rockwell Sertliği.. 348, 349, 351, 352, 353, 354, 356, 364, 365, 366
Shore Sertliği 351, 352, 362, 363
Vickers Sertliği 349, 351, 359, 360, 364, 365, 366
Sertlik Ölçme Cihazları 120, 361, 364, 365
Sertlik Referans Blokları 351, 364, 366
Sertlik Standardı Makineleri 364, 365
Ses Basıncı 448, 449
Ses Basıncı Standardı 449
Seviye Ölçer 132
Shapiro Adımları 187
SI Harici Birimler 50, 51
Sıcaklık..... 49, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 157, 158, 160, 161, 162, 167, 177, 181, 182
SIM 25, 26, 35
Sıvı Akışı 432
Siemens 48
Sievert 49
Sinüs Yaklaşımı Yöntemi 466, 469, 470
Sistematik Ölçüm Hatası 17
Siyah Cisim147, 148, 155, 156, 157, 158, 393, 411, 419, 423
SOAMET 25
Spektroskopi 74, 75, 82, 386, 484
SQUID 211, 212, 272, 277
Standart Sapma 17, 59, 60, 61, 62, 64, 79, 483, 484
Statik Genleşme Sistemi 386, 387
Steradyan 16, 48, 400
Student Dağılımı 63, 64, 65, 490
SURAMET 26
Suyun Üçlü Noktası 20, 47, 146, 150

Ş

Şartlandırıcı Yükselteç 467, 468, 470
Şerit Metre 118, 119

T

Tampon Mastar 101, 102, 103
Tartım Esaslı Sistemler 427, 429
Taşınabilirlik 68
Tayin Sınırı 482, 484
Teleskop 122, 123, 124, 125, 126
Telhis-ül Eşkal 8
Temel Birim 16, 31, 46, 47, 49, 169, 170, 171, 208, 278, 301, 309, 331, 440, 463, 465
Temel Büyüklük 16, 47, 169, 350, 367, 463
Termodinamik Sıcaklık 16, 20, 47, 146, 367, 411
Termofon 448, 449
Tesla 49, 266, 267, 268, 269
Theodolite 122, 126
Tip (Model) Değerlendirmesi 21
Tip Onayı 21, 22, 32
Sınırlı Tip Onayı 21

Tip Onayının Tanınması 21
Titreşim 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475
Titreşim Alanında Birincil Standart..... 464
Titreşim Dönüştürücüsü Hassasiyeti 464
Titreşim Kalibratörü 465
Titreşim Uyarıcı 469, 470, 473, 474, 475
Tork 49, 339, 340, 342, 343, 344, 345, 346
Tork Ölçme Cihazları 339, 343, 344, 345, 346
Tork Standardı Makinesi 341, 342, 343, 344
Torr 368, 385, 386
Total Station.....122, 126
TÜBİTAK.....7, 40, 82
TÜBİTAK MAM 7, 40
TÜBİTAK UME .7, 25, 27, 39, 40, 41, 76, 79, 80, 89, 90, 103, 135, 149, 202, 204, 211, 216, 230, 305, 314, 315, 320, 321, 331, 332, 364, 365, 397, 402, 405, 407, 410, 412, 419, 442, 459, 461, 480
Tümleşik Türetilmiş Birim 17
Türbinmetre..... 429, 430, 434, 435, 436
Türetilmiş Birim ..17, 23, 26, 28, 31, 46, 47, 48, 49, 180, 276, 457
Türetilmiş Büyüklük 16, 17, 48, 49, 50, 296
Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK)..... 30, 39, 41, 43, 44
Türk Standardları Enstitüsü (TSE)..... 6, 36, 39, 42, 45
Twyman-Green İnterferometresi..... 89, 92

U

U Tipi Dağılım 66
Ukiyya..... 8
Ultrasonik Güç 457, 460, 461, 462
Ultrasonik Radyasyon Kuvveti.....457, 461
Ultrasonik Yayınım 458, 460
Ulusal Akreditasyon Kuruluşları..... 30
Ulusal Kütle Skalası 7
Ulusal Metroloji Enstitüleri Avrasya İşbirliği Organizasyonu (COOMET)..... 25, 35
Ulusal Metroloji Enstitüsü .26, 27, 31, 71, 134, 135, 150, 171, 184, 480, 487
Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME) .7, 25, 27, 39, 40, 41, 76, 80, 82, 89, 90, 135, 216, 230, 314, 320, 321, 331, 364, 397, 405, 407, 410, 412, 419, 442, 461, 466, 480
Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM)5, 23, 24, 33, 41, 70, 79, 134, 298, 487
Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM)...4, 23, 27, 41, 70, 386, 476, 487
Uluslararası Akreditasyon Forumu (IAF) 29, 44
Uluslararası Birimler Sistemi (SI)..... 3, 17, 46, 208, 266, 309, 311, 318, 319, 367, 476, 492
Uluslararası Büyüklükler Sistemi 16, 17
Uluslararası Laboratuvarlar Akreditasyon Birliği (ILAC) 28, 29, 30, 44
Uluslararası Ölçme Konfederasyonu (IMEKO) 35, 41
Uluslararası Yasal Metroloji Bürosu (BIML) 33, 34
Uluslararası Yasal Metroloji Komitesi 33
Uluslararası Yasal Metroloji Konferansı 33
Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu (OIML) 33, 34, 119, 302, 303, 304, 434
Usul-i Hendese 8
Usul-i İstihkamat 8
Uygunluk Değerlendirme Kuruluşu.....22
Uygunluk Değerlendirmesi.....19, 21, 22, 29, 33, 39, 42, 43
Uygunluk İşareti 22
Uzunluk 47, 51, 70
Uzunluk Birimi.....70, 71
Uzunluk Ölçümleri.....70

Ü

Üçgen Dağılım 66
Üçlü Nokta 149

V

Vakum 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392
Viskozite 49, 327, 329, 331, 332, 335
Volt 48, 152, 170, 181, 182, 188, 189, 208
Vukiyye.....6, 8

W

Watt..... 48, 170, 180, 181, 256, 393, 394, 410, 419, 457
Weber.....48
Weston Standart Pili 184, 188
Wheatstone Köprüsü 214

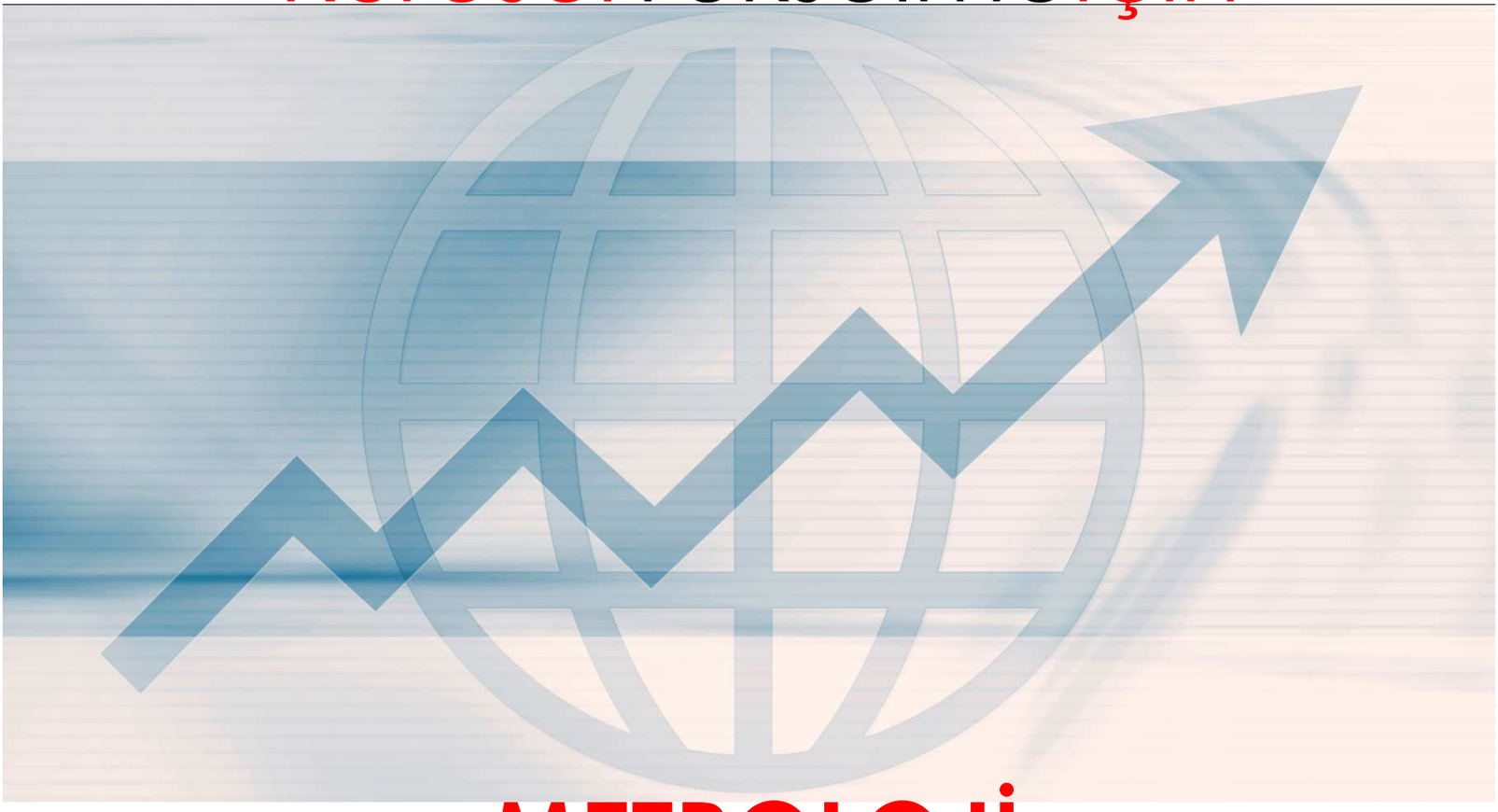
Y

Yansıtıcı Hedef 458, 460, 461, 462
Yapay Kulak 454, 456
Yapay Mastoid.....454, 473
Yasal Metroloji . 3, 16, 19, 21, 22, 31, 32, 33, 34, 39, 42, 119, 302
Yasal Metrolojik Kontrol 21
Yasal Olarak Kontrol Edilen Ölçü Aleti 22
Yer Değiştirme.....463, 465, 467, 469, 471, 472
Yetkilendirilmiş Enstitü 26, 27, 29
Yoğunluk 48, 318, 319, 320, 321, 322
Yutucu Hedef..... 458, 460, 461
Yuvarlaklık Standardı.....108
Yük Hassasiyeti 468, 475
Yüksek Gerilim
AC Yüksek Gerilim.....203
Darbe Yüksek Gerilim 205, 206, 207
DC Yüksek Gerilim.....201
Yüzey Yoğunluğu.....48

Z

Zaman 16, 47, 50
Zaman Birimi 74, 127, 133, 134, 141
Zira-ı a'şarî 4

KüreselYükselmeİçin



METROLOJİ

TÜBİTAK
UME

P.K.54, 41470 GEBZE KOCAELİ / TÜRKİYE
Tel : +90 (262) 679 50 00 Faks : +90 (262) 679 50 01
e-mail: ume@ume.tubitak.gov.tr http://www.ume.tubitak.gov.tr