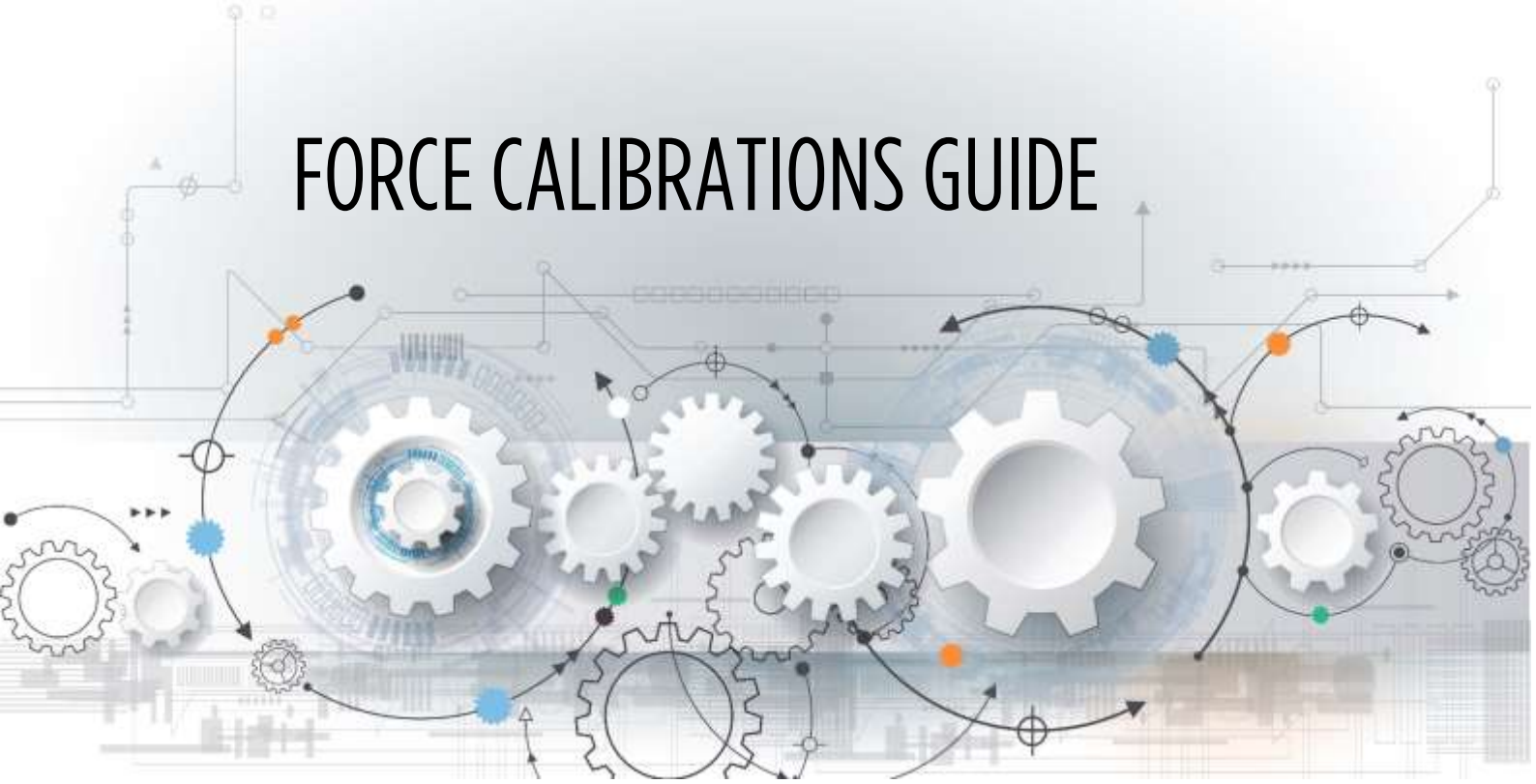


KUVVET KALİBRASYONLARI REHBERİ

FORCE CALIBRATIONS GUIDE



Doç.Dr. BÜLENT AYDEMİR

2021

KUVVET KALİBRASYONLARI REHBERİ

FORCE CALIBRATIONS GUIDE

Doç.Dr. Bülent AYDEMİR

1. basım

Gebze, TÜBİTAK UME, Eylül 2021

Konu: 1) Kuvvet Kalibrasyonu, 2) Kuvvet Ölçümü, 3) Ölçüm Belirsizliği

ISBN: 978-605-312-399-6

© TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü

Bu yapının bütün hakları TÜBİTAK UME'ye aittir. Kaynak gösterilmek şartı ile kitaptan alıntı yapılabilir.

Bu kitaptaki fikir, görüş ve öneriler yazarın kendi görüş ve tecrübeleri kapsamında olup, TÜBİTAK Başkanlığı ve bağlı enstitü ve birimlerini, TÜBİTAK UME ve birimlerini hiçbir şekilde bağlamaz.

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

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	6
1. GİRİŞ.....	7
1.1. Tarihçe	8
1.2. Kuvvet Tanımı	11
2. KUVVET VE KALİBRASYON.....	15
2.1. Genel Tanımlar ve Kavramlar	15
2.2. Ölçüm Belirsizliği	23
2.3. Standartlar ve İzlenebilirlik.....	31
2.4. Çok eksenli ve dinamik kalibrasyon	32
2.5. Metodlar	33
2.5.1. Transfer standardına sahip kalıcı olarak monte edilmiş kuvvet dönüştürücü.....	33
2.5.2. Sökülebilir kuvvet dönüştürücü.....	34
2.5.3. Kalıcı transfer standardı olmadan monte edilmiş kuvvet dönüştürücü	34
2.6. Kalibrasyon İşlemleri	34
2.7. Kalibrasyon Sertifikası	39
2.8. Kuvvet Ölçümünde Akreditasyon.....	44
3. KUVVET ÖLÇÜM VE KALİBRASYON CİHAZLARI	48
3.1. Dirençli Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları	57
3.2. Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları	76
3.3. Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları	85
3.4. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları	93
3.5. Elektro Manyetik Kuvvet Ölçme Cihazları	104
3.6. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazları.....	112
3.7. Ölçme Halkaları.....	113
3.8. Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazı	117
3.9. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları.....	118
3.10. Kuvvet Ölçümlerinde Kullanılan Kalibrasyon Makinaları	119
3.10.1. Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları	120
3.10.2. Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları	125
3.10.3. Hidrolik Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları	126
3.10.4. Birden Fazla Kuvvet Referans Dönüştürücülü Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları.....	127

4. KUVVET KALİBRASYON YÖNTEMLERİ	132
4.1. Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonundan Önce Bilinmesi Gerekenler	137
4.2. EN ISO 376'a Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu	139
4.3. EN ISO 376'a Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı.....	144
4.4. EN ISO 376'a Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması.....	149
4.5. ASTM E74'e Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu	154
4.6. ASTM E74'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	161
4.7. ASTM E74'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması	177
4.8. DKD-R 3-3'e Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu	181
4.9. DKD-R 3-3'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	186
4.10. İndirgenmiş Kalibrasyon Süreçlerinde Ölçüm Belirsizliği Katkıları.....	190
4.11. DKD R 3-3'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması	191
4.12. BS 8422 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu.....	196
4.13. BS 8422'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	206
4.14. BS 8422'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması	208
4.15. GOST R 55223'e Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu	211
4.16. GOST R 55223'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	212
4.17. GOST R 55223'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması	215
4.18. DKD-R 3-9'a Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu	222
4.19. DKD-R 3-9'a Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	227
4.20. DKD-R 3-9'a Göre Belirsizlik Hesabının Sayısal Uygulaması	233
4.21. DKD-R 3-10'a Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu	240
4.22. EN ISO 7500-1'e Göre Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu	247
4.23. EN ISO 7500-1'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	251
4.24. EN ISO 7500-1'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması	257
4.25. ASTM E4'e Göre Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu.....	265
4.26. ASTM E4'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı	270
4.27. ASTM E4'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması	274
4.28. EN 12390-4'e Göre Beton Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu	278
4.29. EN 12390-4'e Göre Beton Test Makinalarının Ölçüm Belirsizliği Hesabı	284
4.30. Malzeme Test Makinalarının Dinamik Kuvvet Kalibrasyonu.....	285
4.31. Malzeme Test Makinalarının Dinamik Kuvvet Kalibrasyonlarının Ölçüm Belirsizliği Hesabı	291
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	294
GERİ DÖNÜŞ VE KATKILAR	294

ÖN SÖZ

Endüstride yaşanan rekabet ve ilerleyen teknoloji nedeniyle daha kaliteli ve güvenilir ürünleri tüketiciye sunmak ve böylece pazar payını artırmak isteyen üreticiler, malzeme ve ürünlerine çeşitli testler uygularlar. Malzeme testleri, endüstriyel ürünlerde kullanılan malzemelerin uygunluklarının belirlenmesi amacı güder. Böylece uygun olmayan malzeme kullanımından kaçınılmış olur. Malzeme testleriyle özellikleri belirlenen malzemeleri kullanmak, dizayn aşamasından ürün aşamasına kadar olan tüm proseste, ekonomik ve daha güvenilir ürünlerin geliştirilmesini ve imalatını sağlar. Bu testlerde kullanılan düzenekler ve makinalar, kuvvetin uygulanması ve ölçülmesi prensibiyle çalışırlar.

Kuvvet ölçümleri ayrıca, kalite kontrol ölçümlerinde, üretim hatlarındaki işlem kontrolünde, robot teknolojisinde, uçak, inşaat, makina, gemi, otomotiv gibi birçok mühendislik dalında, emniyet mühendisliği, tıp (ortopedi), askeri alanda, uzay çalışmalarında ve her türlü ağırlık ölçümlerinde çok yaygın olarak kullanılmakta ve bu nedenle hassas ve doğru ölçülmesi büyük önem taşımaktadır.

Endüstri, bilim ve teknolojideki gelişmeye paralel olarak yüksek doğruluklu kuvvet ölçme cihazlarının geliştirilmesi sağlanmış ve buna bağlı olarak kuvvet ölçümünün önemi ve kullanımı daha da artmıştır. Bu cihazların kullanılması ile yapılacak çalışmaların kalitesi, cihazların uluslararası standartlara izlenebilir kalibrasyonlarının yapılmasıyla mümkün olabilmektedir.

Bu kitap, kuvvet ölçümleri ve kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonları hakkında bilgiye ihtiyaç duyanlara bir rehber olarak yol gösterici olması amacıyla hazırlanmıştır.

Kuvvet kalibrasyonları kitabını yazarken, bu konunun yayılmasında çok önemli katkıları olan değerli bilim insanlarımız; TÜBİTAK UME Kuvvet laboratuvarı eski ve yeni çalışanları, Cemal VATAN, Haldun DİZDAR, Ufuk KURU, TÜBİTAK UME personelleri Uğur AKKAYA, Sema SUBAT ve diğer çalışma arkadaşlarıma, sabır ve anlayışlı desteklerini gördüğüm eşim ve çocuklarıma teşekkürlerimi bildiririm.

Faydalı ve yararlı olması, kuvvet kalibrasyonları konusunun ülkemizde yaygınlaştırılması ve geliştirilmesi dileklerle.

Saygılarımla.

Bülent AYDEMİR, Doç.Dr.

1. GİRİŞ

Kuvvet, her yerde bulunan fiziksel bir olaydır. Atom altı parçacıklarını bir arada tutan güçlü nükleer kuvvetlerden, Dünya'yı Güneş'in etrafında yörüngede tutan zayıf kuvvetlere ve galaksilerde merkez çevresindeki güneş sistemi kuvvetlerine kadar gördüğümüz ve yaptığımız olaylarda bulunan bir etkidir.

Teknolojik uygulamalarda, emniyetli çalışma şartlarını gerçekleştirebilmek ve uzun dönemde kararlı ve ekonomik tasarımlara sahip olabilmek için, sistem üzerine etkiyen tüm kuvvetlerin önceden belirlenmiş doğruluk sınırları içinde bilinmeleri gerekmektedir. Statik ve dinamik olarak yüklenen makina ve yapı elemanlarının konstrüktif özellikleri her zaman teorik hesaplamalarla bulunamaz. Özellikle yüklemeye etki eden etmenlerin kontrol edilemediği durumlarda, özellikleri bilinen bu elemanların değişen işletme koşulları altında nasıl bir yüke maruz kaldıkları çoğu kez hesaplanamaz. Daha ekonomik yapıların oluşturulabilmesi ve makina etkinlik derecelerinin yükseltilebilmesi için önde gelen önemli koşul, kuvvetin doğru olarak ölçülebilmesidir. Bahsedilen bu kuvvet ölçümü, yarı ve tam otomatik çalışan makinaların kontrol zincirinin oluşmasında büyük önem taşımaktadır.

Kuvvet ölçme cihazları, kontrol ve tartım teknolojisi alanında her geçen gün daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Modern haddehanelerde, merdane kuvvetlerinin kontrolü ve bu sistemlerin optimum olarak işletilebilmeleri için, elektriksel ölçüm yapan (dirençli uzama ölçerli) kuvvet ölçme cihazları monte edilmektedir. Silolarda kullanılan kuvvet ölçme cihazları veya yük hücreleri ile doldurma ve paketleme işlemlerinin kontrolü sağlanmaktadır. Kimya ve diğer sanayi kollarında kullanılan yük hücreleri vasıtasıyla; zaman, işçilik ve malzeme konusunda dikkate değer tasarruflar sağlanabilmekte ve böylece artan ürün kalitesiyle birlikte daha yüksek kazanç da elde edilebilmektedir. Havacılık ve uzay sanayiinin gelişmesinde de kuvvet ölçümlerinde sağlanan gelişmelerin etkisi görülmektedir. Dört motorlu bir Jumbo Jet Uçağının toplam 1 MN'luk itme kuvvetine ve Satürn V ay roketinin 30 MN'luk itme kuvvetine sahip olduğunun deneysel yollarla belirlenebilmesi, bu konudaki gelişmelere verilebilecek örneklerdir. İmalatın çeşitli aşamalarında kullanılan makina ve teçhizatın, her türlü kaldırma ve taşıma makinalarının aşırı yüke karşı korunması iş emniyeti açısından bu konunun yaygınlığını gösterebilecek örnekler olarak sunulabilir.

Günümüzde, sağladığı üstünlükler nedeniyle, uygulanan kuvvetle birlikte malzemelerde mekanik gerilmelerin oluşmasından dolayı şekil değiştirmesi ilkesinden faydalanılarak yapılan ölçümler, büyük uygulama alanı bulmaktadır. Malzemelerde oluşan mekanik gerilmeler, değişen fiziksel özelliklerinden saptanabilir. Fiziksel özellik değişimlerinden faydalanan cihazlara dönüştürücü adı verilmektedir.

Genel bir yaklaşımla, bir enerji formunu bir başka forma çeviren cihazlar da dönüştürücü olarak tanımlanabilir. Bu yaklaşımla kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye çeviren piller ve ısı enerjisini bir sıvı kolonunun yer değişimine çeviren sıradan bir cam termometre de birer dönüştürücü olarak tanımlanabilmektedir.

Dönüştürücüler, elektrik direnç, indüktans, kapasitans, piezoelektrik gibi birbirlerinden çok farklı çalışma prensipleriyle üretilmektedirler. Çok geniş bir aralıkta dinamik kuvvet ölçümünde kullanılan minyatür dönüştürücüler, boyutlarının küçük, ağırlığının hafif ve kendinden elektrik çıktısı üretebilmesi sebebi ile genellikle piezoelektrik elemanlarla donatılmışlardır. Eğer şartlar uygunsa, benzer şekilde kapasitif veya indüktif elemanlar da kullanılabilir. Buna karşın, uygun yüzeylere yapıştırılabilen elektrik dirençli uzama ölçerlerin otomasyon sistemlerine uygun kullanım özellikleri nedeni ile son yıllarda kullanımı önemli oranda artmıştır.

Dirençli uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüleri uygulanan mekanik enerjiyi ölçmek ve/veya kontrol etmek için şekil değişimine karşılık gelen elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Elektromekanik dönüştürücülerin bu tipleri genellikle kuvvet veya enerjinin uygulandığı bölgeye yerleştirilir ve buradaki yerdeğişim miktarlarına göre reaksiyon gösterirler. Gösterge veya kontrol cihazları, dönüştürücülerden ayrı ve uygun bir yere yerleştirilerek birbirleri ile kablo bağlantısı yapılır ve meydana gelen elektriksel değişimleri kullanıcının görmesine olanak tanır.

1.1. Tarihçe

Aristoteles, doğal olayları gözlem ve felsefi akıl yürütmenin bir kombinasyonu ile düşünen bir yaklaşımla değerlendirmiştir. En ağır element olan “Dünya” ve en hafif element olan “Ateş” in birbirine oranının bir beden in doğal hareketini belirlediğini ileri sürdü. Dünyada var olan nesneler veya cisimler, dört element in bileşimine göre yukarı veya aşağı doğru doğal yerlerine hareket ettiklerini tespit etti. Dünyanın dışarıdan evrenin merkezine, merkezdeki ateş in ise yukarıya doğru bir kuvvet uyguladığını düşündü. Onun gözlemleri o sırada teknolojinin yetersizliği nedeniyle kısıtlıydı. Örneğin, bir boşluğun imkânsız olduğu düşünülüyordu, ancak teorik olarak mevcut olsaydı, o zaman boşluktaki hareket sonsuz hızlı olurdu. Dünyada var olan hareketle (yukarı veya aşağı) hareket eden bir nesnenin ideal hızı, ağırlığı ile doğru orantılıydı.

Bir sistem gözlemlendiğinde, sürtünmenin ihmal edilebilir bir rol oynadığı göz önüne alındığında, cisimlerin doğal durumunu koruyacağı düşünülüyordu. Zorla veya doğal olmayan hareketi sürdürmek için ise sürekli kuvvet uygulanması gerekiyordu. Örneğin havada bir mızrağın uçuşunda, ilk itici kuvvetten sonra, mızrağa sabit kuvvetin içinden geçtiği hava tarafından sağlandığı düşünülüyordu. Gök cisimlerinin hareketi ise farklı kabul ediliyordu.

17. yüzyılda, Galileo Galilei savaş topları ile denemeler yaptı ve yerçekimi nedeniyle hızlanmanın nesnenin ağırlığına bağlı olmadığını ve sürtünme kuvvetinin sabit kalacak hareketi yavaşlatmaktan sorumlu olduğunu teorileştirmek için eğimli denemeler yaptı.

Sir Isaac Newton'un "Principia Mathematica"nın 1687'de yayınlanmasıyla, yaklaşık 300 yıl sürecek hareket yasalarının matematiksel bir açıklaması önerildi. Newton, Dünya'ya doğru düşen nesnelerden ve Ay'ın dünya çevresindeki hareketinden aynı yerçekimi kuvvetinin sorumlu olduğunu fark etti. Newton, nesneler arasında yaşanan kuvvetlere dayanarak, hem karasal hem de gök cisimlerinin hareketini hesaplamak ve tahmin etmek için bir yöntem tanımladı. Newton'un akıl yürütmesi o kadar ilgi çekiciydi ki, Merkür gezegeninin yörüngesindeki Newton modeliyle tam olarak açıklanamayan tutarsızlıklar gözlemlendiğinde, astrofizikçiler tutarsızlıkları açıklayacak gözlemlenmemiş yeni bir gezegenin olabileceğini düşündüler. Böyle bir gezegen bulunamadı, ancak Albert Einstein (1916) genel izafiyet teorisinde gözlemlenen hareketi tam olarak açıklayan bir düzeltme ekledi.

Kuvvet ve ona bağlı oluşturulan moment bilgisi kullanan eski yüzyıllara ait cihazlar manivela ve terazilerdi. Mısır, eski Yunan ve Roma uygarlıklarında kuvvet ve moment vektörel notasyon olarak ifade edilmekteydi. Bu vektör kavramı, kuvvetin bileşenlerine ayrılabilmesine ve tekrar toplanabilmesine olanak sağlamıştır. Tarih boyunca cisimlerin mukavemetiyle ilgili çeşitli çalışmalar yapılarak malzemelerin dayanabileceği gerilme değerleri, kopma noktaları irdelenmiş ve elde edilen bilgiler sonucunda, teoride ve uygulamada karşılaşılan problemler çözülmeye çalışılmıştır. Bu gelişmeler zamanla daha da mükemmel düzeyde kuvvet ölçümüne olanak sağlayan cihazların yapılabilmesine olanak sağlamıştır. İşte bu cihazlardan birisi olan ve günümüzde en yaygın kullanılan kuvvet ölçme cihazları elektrik direnç gerinim ölçerli (strain gauge) dönüştürücüleridir.

Elektrik dirençli uzama ölçerli dönüştürücülerin gerçek tarihsel gelişimi tam olarak bilinmemekle birlikte Lord Kelvin tarafından, 1800'lü yıllarda elektrik tellerinde mekanik birim şekil değişiminden dolayı direnç değişimi meydana geldiği belirtilmiştir. 1908 yılında Almanya Charltonburg'da Dr.St.Lindeck tarafından ilk uzama ölçerli basınç dönüştürücüsünün prensiplerine dair bilgiler verilmektedir. Buna göre bir uzama ölçerli dönüştürücü, ince cidarlı bronz tüp üzerine sarılmış ince metal tellerden oluşan hassas dirençler ile çalışmıştır. Burada ele alınmış olan konstrüktif yapı, tellerin vernikle kaplandıktan sonra tüp yüzeyine yapışmaları için fırınlanmasından ibarettir. St. Lindeck bu tip dirençlerin kararlılığını etkileyen faktörleri incelerken tüpün uçlarını kapatıp iç basıncı yaklaşık 5.5 MPa'ya yükseltmiş ve bu sırada bobin (boruya sarılı tel sargı) direncinin basınçla doğru orantılı olarak değiştiğini gözlemlemiştir.

E.E. Simmons ve A.C. Ruge genellikle elektrik dirençli uzama ölçerlerin ikinci mucitleri olarak kabul edilirler.

Özellikle Ruge bu tip uzama ölçerlerin uygulamada kullanılabilen birçok farklı şeklini geliştiren ve bunları kullanarak dönüştürücüler imal eden ilk kişi olmuştur. Yüzeye yapıştırılmadan kullanılan uzama ölçerler, bu tip uzama ölçerlerin geliştirilmesinden önce de, sonra da biliniyor ve kullanılıyordu. Ancak bunlar, daha problemsiz olmakla birlikte daha az doğrulukla ölçümler yapabilmekteydiler.

1950'li yıllarda metalik plakalı uzama ölçerlerin geliştirilmesiyle, dönüştürücülerin sürünme (creep) özellikleri geliştirilmiş; karmaşık geometriye sahip dönüştürücülere de uygulanabilecek çeşitli formlara sahip olabilmeleri sayesinde dönüştürücü tasarımında büyük gelişmeler kaydedilmiş ve bu gelişmeler ışığında günümüzde de kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının tasarlanabilmelerine olanak sağlamıştır.

Kuvvet uygulamalardaki temel sorunlardan biri, konstrüktif yapının gerilme altındaki elemanının zarar görmeden dayanacağı, bir başka ifade ile test edilen eleman içerisindeki kuvvet dağılımının ve malzemenin dayanabileceği gerilme miktarının belirlenebilme güçlüğüdür. Antik uygarlıklardaki binalar incelendiğinde bu problemin pratik çözümlerinin bulunduğu, ancak yazılı kaynakların günümüze ulaşamadığı anlaşılmaktadır. Malzeme mukavemeti üzerine yapılan çalışmalarla ilgili olarak Leonardo da Vinci'ye ait olanlardan daha öncesine giden yazılı bir kaynak yoktur. Bu konudaki deneysel çalışmalar Galileo (1638) ve Mariotte'nin (1740) çalışmalarında da yer almaktadır. Ancak bu çalışmaların büyük çoğunluğunda, malzeme ve uygulanan kuvvet değişkenlerinin iyi tanımlanamamasından dolayı, tüm bu etkilerin göstergesi olarak sadece malzemenin kopma noktası alınmıştır.

Kopma kanunları, bugün artık çok iyi bilinmekle birlikte, çeşitli malzeme tiplerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Yapıların içindeki kuvvet dağılımı, 17. yy.da Hooke tarafından formüle edilmiş olan malzemelerin elastik davranışlarını ifade eden kanun ile geometrik ve analitik yolla incelenebilmektedir. Malzemelerin dayanımları ile ilgili çalışmalar, kopma noktasının araştırılması aşamasından, Hooke kanunu ile doğruluğu belirlenebilecek olan elastik bölgenin belirlenmesi aşamasına kadar olan çalışmaları kapsamaktadır.

Büyük ölçüde 19. yüzyılda geliştirilmiş olan elastisite teorisinin doğruluğu günümüzde, mekanik gerilme analizi için uygulanan deneysel teknikler aracılığı ile (uzama ölçer - strain gauge tekniği veya fotoelastisite ile) kontrol edilebilmektedir. Bu deneysel teknikler, elastisite teorisinin analitik yöntemlerinin sadece basit şekilli, düz parçalara ve yapılara uygulanabilmesi nedeniyle, yirmi yıl öncesine kadar karmaşık yapıların gerilme analizinde tek yöntem olarak gözükmekteydi. Oysa günümüzde, bilgisayarların çok yüksek hesap yapabilme kabiliyetleri, sonlu elemanlar analizinin (Finite Elements Method-FEM) kullanımını mümkün kılmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde herhangi bir yapı, denge ve birbirlerine uyum koşullarını sağlayan çok küçük elemanlara ayrılmakta ve sınır koşulları tanımlanmaktadır. Bu sayısal yöntemle, karmaşık yapıların gerilme ve deformasyon durumları hesaplanabilmekte ve yapı içinde gerilmeye yol açan “kuvvet akışı” elde edilebilmektedir.

Kuvvet metrolojisi, çeşitli ölçüm yöntemlerinin gelişmesi ve ölçüm doğruluğunun artmasıyla beraber gelişmiştir. Bununla birlikte, hem günlük yaşantımızda hem de teorik araştırmalarda sık kullanılan bir büyüklük olan kuvvetin teorik (Jammer, 1957) ve uygulamalı (Timoshenko, 1953) alanlardaki tarihçesi, değerlendirilmeleri tekil olarak yapıldığında daha rahat anlaşılacaktır. Çünkü bu iki uygulama, kuvvet çalışmalarının statik ve dinamik olarak adlandırılan iki ayrı formunu büyük oranda etkilemiştir. Kuvvetler dengesinin sözkonusu olduğu statikte, çeşitli kuvvet formları (ağırlık, elastik, manyetik, elektrostatik) karşılıklı olarak mukayese edilmekte ve bunlardan bir tanesi, diğerlerini ölçmek üzere referans olarak seçilmektedir. Kuvvet etkilerinin cismin hareket koşullarında kendisini açıkça gösterdiği dinamikte ise kuvvet, kütle, uzunluk ve zaman büyüklükleri cinsinden ölçülmek durumundadır.

Sonuç olarak, günümüzde uzama ölçer imalatında elde edilen gelişmeler, yay elemanı olarak kullanılabilecek yeni alaşımların geliştirilmesi ve bilgisayar teknolojisinin gerek teorik hesaplamalarda, gerekse imalat teknolojilerinde yer almasıyla çok daha yüksek doğruluklu, küçük ebatlı ve düşük maliyetli kuvvet dönüştürücüleri uygun konstrüksiyonlarda tasarlanıp üretilmektedir.

1.2. Kuvvet Tanımı

Kuvvet, nesneler arasındaki etkileşimin bir ölçüsü ve kütleli bir cisme hareket kazandıran etkidir. Hem büyüklüğü hem de yönü olan bir vektörel büyüklüktür. Eğer bir cisim dengede ise, vücuda etki eden kuvvetlerin toplamı sıfırdır. Newton'un ikinci yasasına göre sabit kütleli bir cisim, üzerine uygulanan net kuvvetle doğru cismin kütlesi ile ters orantılı bir şekilde hızlanır. Türetilmiş SI kuvvet birimi, Sir Isaac Newton'un onuruna Newton (N) olarak adlandırılmıştır. 1 Newton, 1 kg'lık kütleyi 1 m/s² ivmelendirmek veya hızlandırmak için gereken kuvvet olarak tanımlanır. Genel olarak, kuvvet aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1)$$

burada F Newton olarak kuvvet; m, cismin kilogram cinsinden kütlesi ve a, metre bölü saniye kare cinsinden cismin ivmesidir.

Uluslararası birim sisteminde (SI) kuvvet birimi olarak Newton kullanılmaktadır ve 1960 yılında uluslararası bir anlaşma ile tanımlanmıştır.

Herhangi bir ortamda, yerçekimi ivmesinin bir kütle üzerindeki etkisinin büyüklüğü ise Arşimed etkisi gözönünde bulundurularak (3) no'lu formül ile belirlenir:

$$F = K \cdot g_{yerel} \cdot (m - V \cdot \rho_{hava}) \quad (3)$$

$$F = K \cdot m \cdot g_{yerel} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{hava}}{\rho_{k\u00fctle}}\right) \quad (4)$$

K : Oran katsayısı,

m : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin kütlesi,

g_{yerel} : Yerel yerçekimi ivmesi,

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu,

V : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin hacmi,

$\rho_{hava} \cdot V$: V hacmine sahip kütle üzerinde ρ_{hava} yoğunluğuna sahip havanın kaldırma etkisi

$\rho_{k\u00fctle}$: Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin yoğunluğu'dur

3 ve 4 no'lu formülde belirtilmiş olan K katsayısının, kullanılan birimlerle ilişkisi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Newton'un İkinci Kanununda Çeşitli Birimler İçin K-Sabiti

F	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 (5) no'lu ampirik formül kullanılabilir:

$$\rho_{hava} = \frac{0.348444 \cdot P - (0.00252 \cdot T - 0.02052) \cdot H}{273.15 + T} \quad (5)$$

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu, [kg/m³]

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 değişmektedir. Bundan başka mevsimler ve ayın konumu ile de küçük değişiklikler gözlenmektedir. Standart yerçekimi ivmesi deniz seviyesi ve 45° enlemdeki değere karşılık gelmekte olup; değeri (6) no'lu bağıntı ile verilmiştir:

$$g_{\text{standart}} = 9.80665 \text{ m/s}^2 \quad (6)$$

Herhangi bir enlemdeki “g” yerel yerçekimi ivmesi [m/s²] (7) no’lu formül ile belirlenebilir:

$$g_{\text{yerel}} = 9.78049 \cdot (1 + 0.0052884 \cdot \sin^2\phi - 0.0000059 \cdot \sin^2 2\phi) \quad (7)$$

O enlemdeki yerçekimi ivmesi için ise rakım [m] düzeltmesi [m/s²] (8) no’lu formül kullanılarak yapılabilir:

$$\text{Düzeltilme} = -(0.00030855 + 0.00000022 \cdot \cos 2\phi) \cdot h + 0.000072 \cdot \left(\frac{h}{1000}\right)^2 \quad (8)$$

Ağırlık, cismin ağırlık merkezinden yeryüzünün merkezine doğru yönelmiştir. Yerçekiminden dolayı oluşan kuvvetlere yaygın olarak “yük” denilmektedir. Bir noktaya kuvvet uygulamak, o noktayı yüklemek şeklinde de ifade edilebilir. Konuşma dilinde kullanılan kuvvet ve yük tanımları aynı fiziksel büyüklüğü ifade etmektedirler.

Uluslararası Birimler Sistemi SI’den 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.

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N} \quad (9)$$

Benzer şekilde ABD’de kuvvet için bir başka birim olan libre kuvvet [lbf] kullanılmaktadır. Libre kuvvet’in Newtona dönüşümü aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir.

$$1 \text{ N} = 0.22481 \text{ lbf} \quad (10)$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448194 \text{ N} \quad (11)$$

Tablo.2’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.

Tablo 2. Çeşitli Birim Sistemlerinde Temel Birimlerle Kuvvet Birimi Arasındaki İlişki

	SI birim sistemi	CGS birim sistemi	MKS birim 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 x 10 ⁵ dyn	1 kgf

2. KUVVET VE KALİBRASYON

Kuvvet ölçüm sistemlerinin seçimi, çalışması ve tasarımı önemlidir. Ancak, uygun dönüştürücü ve uygun sistem tasarımında bile, sistemin performansının kontrolü yapılmadan ölçümlerine güvenilmemelidir. Beklenmeyen kurulum etkileri, ekipmanın zaman içinde bozulması veya kullanıcıdan kaynaklı hatalar, planlanan tasarımdan daha büyük bir belirsizlik içeren bir ölçüme neden olabilir. Sonuç olarak, kuvvet ölçümünün kullanıcının gereksinimlerini karşılamasını ve gereken belirsizlik derecesini elde etmesini sağlamak için kalibrasyon gereklidir.

Bir kuvvet ölçüm sisteminin kalibrasyonunun anlaşılabilmesi için öncelikle genel tanımların yanında ölçüm belirsizliği, izlenebilirlik, standartlar, prosedürler ve verilerin analizinin anlaşılmasını gerektirir. Bu konular sıra ile ele alınacaktır.

2.1. Genel Tanımlar ve Kavramlar

Kalibrasyonun daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle metrolojide sık sık kullanılan bazı tanımların açıklanması gerekir. Bazı ilgili tanımlar “Uluslararası Metroloji Sözlüğü - Temel ve Genel Kavramlar, İlgili Terimler (VIM)” dokümanına uygun olarak aşağıda 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 değerın 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.

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 değer 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. $\mu V/V$, $\mu\Omega/\Omega$, 10^{-6} , ppm, % şeklinde gösterilir.

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

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

$$\text{Bağıl Hata} = \frac{\text{Mutlak Hata}}{\text{Nominal Değer}} = \frac{-0,04 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = -4 \times 10^{-5} = \% 0,004 = 40 \text{ ppm}$$

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.

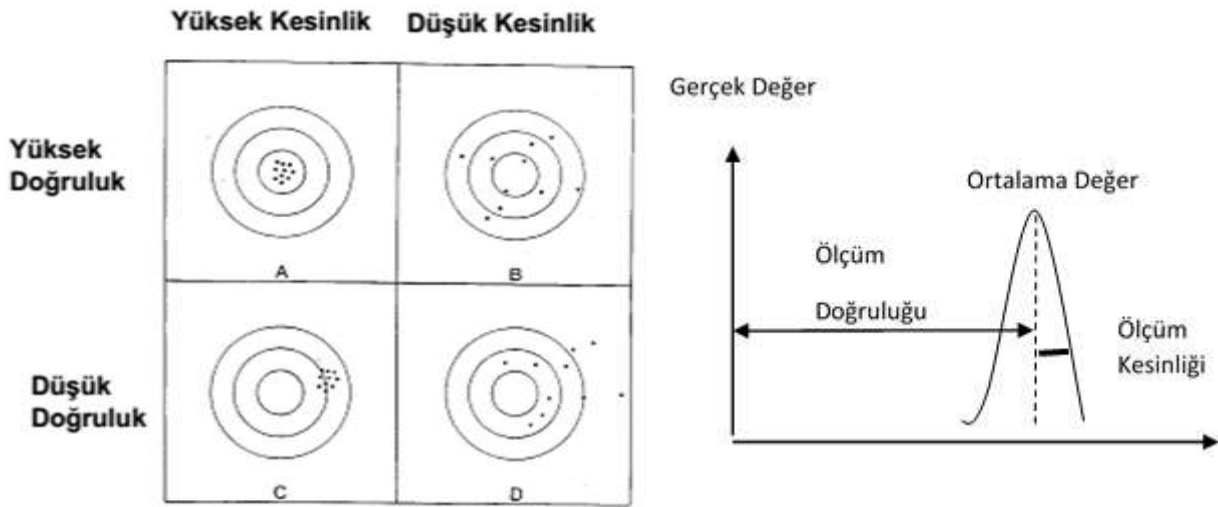
Örnek: Nominal olarak 1 m uzunluğa sahip çelik bir cetvel mikrometre düzeyinde bir doğrulukla ölçülmek istenirse ölçüm sırasındaki sıcaklık ve basınç değerlerinin uzunluk değişimine etkisi bilinmeli ve uygun doğrulukta bir matematiksel ifade ile verilmelidir. Ancak milimetre düzeyindeki bir doğrulukla 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 $2 \mu\Omega$ 'dur.” ifadesi kabul edilebilir bir ifade iken “Ölçüm sonuçlarının kesinliği $2 \mu\Omega$ 'dur.” ifadesi kabul edilemez.



Şekil 4. Ölçüm kesinliği, ölçüm doğruluğu ve ortalama değerin gösterimi

DeneySEL Standart Sapma

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

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

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, 17, 21} olsun.

Verilerin aritmetik ortalaması aşağıdaki eşitlik kullanılarak $\bar{x}_A = 12,8$ olarak hesaplanır.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{7 + 8 + 11 + 17 + 21}{5} = 12,8$$

Standart sapma, Eşitlik (3) kullanılarak;

$$s_A = \sqrt{\frac{1}{6-1} ((7-12,8)^2 + (8-12,8)^2 + (11-12,8)^2 + (17-12,8)^2 + (21-12,8)^2)} = 5,38$$

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.

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 ögenin 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: Uygun görüldüğünde ölçüm belirsizliğinin dikkate alınması gerekmektedir.

NOT 2: Tanımdaki öge, 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 mekânda 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. Ölçüm Belirsizliği

Tanım olarak, elde edilen bilgiye dayanılarak ölçülene atfedilen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, negatif olmayan sayısal parametredir. Başka bir kaynakta ise, ölçüm belirsizliği, $\pm$ 'den sonra gelen sayıdır. Örneğin, 10 ± 1 mg/L şeklinde verilen bir sonuç normalde, gerçek değer 9-11 mg/L aralığındadır, şeklinde yorumlanır.

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 dâhil 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.

Ölçüm belirsizliğine, müşteriler doğru karar vermek için, ölçüm sonucu ile birlikte laboratuvar ise kendi ölçüm kalitesini bilmek ve gerektiğinde bu kaliteyi artırmak için ihtiyaç duyarlar.

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 “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 $h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0$ olup, burada Y , ölçüm modelindeki çıktı büyüklüğü olan ölçüleni göstermektedir. Ölçülenin büyüklük değeri, ölçüm modelindeki $X_1, \dots, X_n$ 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, $h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0$ olarak ifade edilen bir ölçüm modeli $Y = f(X_1, \dots, X_n)$ şeklinde açıkça yazılabildiği durumda, f bir model fonksiyonudur. Daha genel olarak

f fonksiyonu, $X_1, \dots, X_n$ girdi büyüklük değerlerine karşılık tek bir $y = f(X_1, \dots, X_n)$ 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 aşığıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır;

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

Eşitlik’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 2’de verilen n adet ölçümden oluşan bir seri için ölçüm sonuçların dağılımını karakterize eder.

Tablo 2. 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.

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

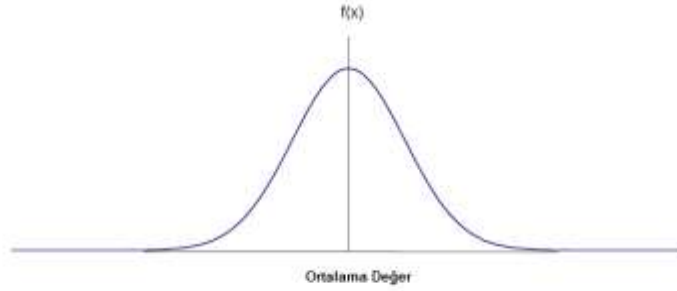
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

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

x : Ölçüm sonucu

μ : Ölçülen büyüklüğün gerçek değeri

σ : Standart sapma



Şekil 6. 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 3'deki veriler kullanılır.

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

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

$p = \% 68$

$\gamma = n-1$ 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.

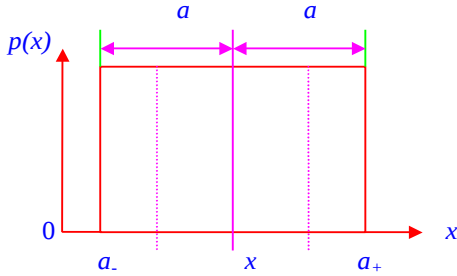
Tablo 3. Student dağılımı ile normal dağılım arasındaki farkı dengeleme faktörü

Serbestlik derecesi $\gamma=n-1$	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:

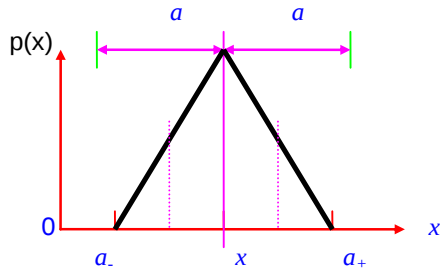
$$u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}}$$

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:

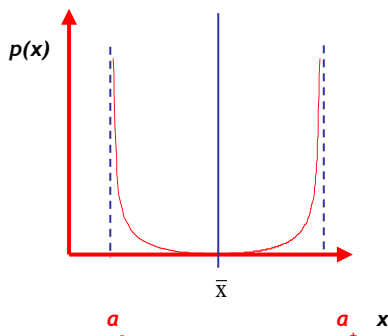
$$u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{6}}$$

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:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

Bileşik Standart Ölçüm Belirsizliği

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:

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

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

Genişletilmiş Ölçüm Belirsizliği

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:

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

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

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 şekline veya alt bileşenlere ayrılmış olmasından bağımsız olarak elde edilebilmelidir.

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

Ölçüm Sonuçlarının Raporlanması

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 ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmelidir.

2.3. Standartlar ve İzlenebilirlik

Uygun standartlara göre izlenebilirlik, ölçümlerin doğruluğunu sağlamanın en iyi yoludur ve farklı zamanlarda ve yerlerde kullanıcılar arasında ölçümlerin tutarlılığını sağlar. İzlenebilir bir ölçümün kesintisiz bir kalibrasyon zinciri aracılığıyla birincil ölçüm standardı ile ilişkili olabilmesi olarak bilinir.

Birincil standartları genellikle ulusal standart veya uluslararası standart olarak bilinen tek yetkili ölçüm cihazı ile ulusal veya uluslararası düzeyde tanımlanır. İzlenebilirlik, kalibrasyonların akredite bir laboratuvar (örneğin TSE) tarafından, ulusal standartlar laboratuvarı (Türkiye’de TÜBİTAK UME) tarafından ya da karşılıklı tanıma anlaşmasında var olan bir ülkede ulusal veya akredite laboratuvar tarafından yapıldığı anlamına gelir.

Standart bir kuvvetin standart bir kütleden daha az görselleştirilmesi daha kolaydır ve doğası gereği bir eser olarak ayrı bir varlığa sahip olmak yerine bir makina tarafından oluşturulmalıdır. Kuvvetin büyüklüğü sadece gerekli belirsizlikle bilinmemeli, aynı zamanda yönü ve test edilen dönüştürücüye uygulanma koşulları da bilinmelidir.

Kuvvet kalibrasyon makinaları, kuvvet standardı makinaları olarak bilinirler ve birincil veya ikincil olarak kategorize edilebilirler. Birincil kuvvet ölçüm standartlarında olan belirsizlik; kütle, uzunluk ve zaman temel ölçüm birimleri ile doğrulanabilir makinalardır. İkincil standart makinalar, genellikle bir gerinim ölçerli yük hücresi şeklinde kalibre edilmiş bir kuvvet dönüştürücüsü olan ve kuvvet transfer standardı kullanılarak kuvvetleri güvenilir bir şekilde üretebilen ve birincil standartlarla

karşılaştırılabilen makinalardır. Kuvvet standart makinalarının tipleri ve özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

Kalibrasyon sırasında kullanılan dönüştürücü, gösterge ve tüm kuvvet ölçüm sistemi ile birlikte kalibre edilmiş olmalı ya da kalibrasyon ekipmanlarının ayrı ayrı kalibre edilerek tam izlenebilirliğe sahip olarak kullanılmalıdır.

Kuvvet ölçümü alanındaki çoğu yazılı standartlar, malzeme testlerindeki izlenebilirlik ihtiyacını karşılamak için yazılmıştır. Bu standartlarda yer alan prosedürler, diğer birçok sektördeki kuvvet ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu için de kullanılır, bununla birlikte ISO 376, ASTM E74, BS 8422 standartları, diğer alanlarda kuvvet izlenebilirliği gereksinimlerini karşılamak için geliştirilmiştir. Tek eksenli malzeme test makinalarının kalibrasyonu veya doğrulanması için EN ISO 7500-1 ve ASTM E4 standartları kapsamındadır.

Tablo 6. Kuvvet standardı makinesi tipleri

Makina Tipi	Çalışma Prensibi	Belirsizlik*	Kategori
Ölü ağırlıklı makinalar	Bilinen bir kütle, Dünya'nın yerçekimi alanında askıya alınmakta ve destek üzerinde bir kuvvet oluşturmaktadır.	% 0.001	Birincil veya İkincil
Hidrolik büyütmeli makinalar	Küçük bir ölü ağırlık makinesi, bir piston-silindir ünitesine bir kuvvet uygular ve bu şekilde üretilen basınç, daha büyük bir piston-silindir ünitesinde büyük kuvvetler oluşturur.	% 0,02	İkincil
Manivela büyütmeli makinalar	Kuvveti artıran kollara sahip küçük bir ölü ağırlık makinası	% 0,02	İkincil
Referans kuvvet sensörlü makinalar	Bir veya daha fazla kuvvet transfer standardı kalibre edilecek cihazla seri olarak yerleştirilir (tipik olarak bir malzeme test makinası)	% 0,02	İkincil
Uzama ölçerli hidrolik makinalar	Bir cihaza kuvvet uygulanması, makinanın gövdesindeki uzama ölçerli kolonlardaki tepkime ile oluşur.	% 0,05	İkincil
* Belirsizlik, laboratuvar ortamında tipik olarak elde edilebilecek en düşük değerle ilgilidir.			

2.4. Çok eksenli ve dinamik kalibrasyon

Yukarıda verilen teknikler ve standartlar, iyi tanımlanmış tek eksen boyunca hareket eden statik kuvvet ölçme sistemlerin kalibrasyonu için geliştirilmiştir. Çok eksenli durumlar ve statik olmayan (dinamik) kuvvetleri ölçen sistemler için kalibrasyonlar da gereklidir.

Çok eksenli kalibrasyon, tek eksenli kalibrasyona benzer, ama her eksen için bir defa gerçekleştirilir. Çok bileşenli kuvvet sensörlerinin kalibrasyonu, prensipler aynı kalmasına rağmen, daha fazla ekipman talep eder. Çapraz konuşmanın (Cross Talk) ölçülmesi bazı yeni düşünceler gerektirir. Çapraz konuşma, bir eksen boyunca uygulanan bir kalibrasyon kuvvetinin farklı bir

bileşen üzerine etkisidir. Örneğin, bir y-bileşen kuvvetinin neden olduğu x-ekseni dönüştürücüsündeki bir çıkış değişikliğidir. Çapraz konuşma etkilerinin büyüklüğünü belirlemek için özel amaçlı kalibrasyon makinaları veya bağlantıları oluşturmak gerekebilir.

Dinamik kuvvet kalibrasyonu için henüz belirlenmiş bir prosedürü yoktur. Statik olarak türetilmiş kuvvet dönüştürücü hassasiyetlerinin genellikle dinamik kuvvet ölçümleri için geçerli olduğu varsayılmaktadır. Yük hücreleri veya dinamometrelerin dinamik davranışı (doğal frekans), sensörün monte edildiği yapıdaki bileşenlerin rijitliklerine ve ağırlıklarına büyük ölçüde bağlıdır.

2.5. Metodlar

Kuvvet ölçüm sisteminin belirsizliğini tespit etmek için üç ana kalibrasyon seçeneği vardır. Bunlar şu şekildedir:

- Birincisi, kuvvet dönüştürücüyü kalıcı olarak monte edilmiş konumunda bırakmak ve kalibrasyonları gerçekleştirmek için bir transfer standardı kullanmaktır.
- İkincisi, kurulumdan önce kuvvet dönüştürücüsünü kalibre etmek ve başka kalibrasyonlar için uygun şekilde çıkartarak yine kalibrasyona yollamaktır.
- Üçüncü seçenek ise, kuvvet dönüştürücüsünü kuvvet kalibrasyon sisteminde kalıcı kurulumundan önce kalibre etmek ve ardından kurulum ömrü boyunca yeniden kalibre etmemektir.

2.5.1. Transfer standardına sahip kalıcı olarak monte edilmiş kuvvet dönüştürücü

Düşük düzeyde belirsizlik gerektiren bir sistem için tercih edilen seçenektir. Kalıcı olarak kuvvet dönüştürücü monte edildikten sonra düzenli kalibrasyon sağlamak için bir transfer standardı kullanılır. Montaj öncesi kuvvet dönüştürücü uygun ölçüm yönünde, ölçüm aralığı ve uygulanan kuvvet süresinde tipik bir çalışma döngüsünde beklenen çalışma koşullarında kalibre edilmelidir. Teslimattan önce üretici tarafından ilk kalibrasyon ve tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik, sıfır, tersinebilirlik, sürünme hatalarını belirlemek için kullanılır.

Sisteme uygun aralıklarla, bir transfer standardı monte edilmiş kuvvet dönüştürücüye seri olarak bağlanır ve her iki kuvvet dönüştürücünün çıkışları karşılaştırılır. Bu kalibrasyonda belirsizlik seviyesinin düşük sağlanabilmesi için aynı zamanda yükleme ve dönüştürücüdeki herhangi bir değişiklik ya da sorun tanımlanmalıdır. Belirsizlik ve kalibrasyon zaman ölçeklerinin düşük sınırlarda karşılaştırmak için çalışırken otomatik kalibrasyon kullanılması uygun olabilir. Otomatik kalibrasyon daha doğru kuvvet ölçüm dönüştürücü çalışma koşulları yansıtabilir ve bu nedenle sistem belirsizliği azaltabilir.

2.5.2. Sökülebilir kuvvet dönüştürücü

Kuvvet dönüştürücü sökülebilir bir konumdadır. İlk kalibrasyondan sonra diğer kalibrasyonları için yerinden sökülerek yeniden kalibre edilmesi için bir üst seviye laboratuvara periyodik olarak kalibrasyona yollanır. Bu yöntem, dönüştürücü için doğru ve düşük bir belirsizlik değeri sağlar, ancak montaj etkisi, sürtünme, eksantriklik hatası vb. gibi kurulum kayıplarını içermez. Bu durumda da önemli hatalara neden olabilir.

2.5.3. Kalıcı transfer standardı olmadan monte edilmiş kuvvet dönüştürücü

Periyodik kalibrasyon olmayan kalıcı olarak monte edilmiş kuvvet dönüştürücü uygulamasının pratik olduğu da düşünülebilir. Başlangıçtaki kalibrasyon sapması ve operasyonel ömrü boyunca kuvvet dönüştürücüdeki bozulmaları karşılamak için sistem gereksinimleri içinde iyi bir belirsizlik düzeyi belirlenmelidir. Devam eden sürelerde kullanım belirsizlik seviyeleri bazı tanımlanmış çalışma noktaları kontrol edilerek veya ilk sıfır kuvveti ile kontrol edilebilir. Ancak bu metotta kullanıcının ilk kalibrasyonu izlenebilir bir sertifika olsa bile, herhangi bir izlenebilirlik talebinde bulunamaz.

2.6. Kalibrasyon İşlemleri

Bir kuvvet ölçüm sisteminin kalibrasyonunu planlarken, kullanıcının aşağıdaki soruları dikkate alması gerekir:

Cihazlar ne zaman kalibre edilmeli?

Farklı koşullar altında ve farklı belirsizlik özellikleri ile çalışan farklı dönüştürücüler için farklı aralıklarla yeniden kalibre edilmeleri gerekmektedir. Kalibrasyon aralığı karar için iyi bir başlangıç noktası tanımlanmalı, özellikle cihaz üreticisinin uzun süreli kararlılık değerleri incelenmelidir. Bir kaç kalibrasyon sonrasında aralığı çok uzun (kalibrasyon değerleri önemli ölçüde değişir) veya çok kısa olduğu belirgin ise (kalibrasyon değerlerinde kayda değer değişiklik yoktur) kalibrasyon periyodu bu bilgilere göre ayarlanabilir. Bazı standartlarda ise kalibrasyon periyodu için tanımlamalar verilmiştir. Bu durumda standardın tavsiyelerine uyulmalıdır. Örneğin EN ISO 376 standardına göre kuvvet ölçme cihazlarının periyodu 26 ayı geçmeyecek şekilde tanımlanır. Yine benzer şekilde EN ISO 7500-1 standardına göre malzeme test makinalarının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyon periyodu 12 ayı geçmeyecek şekilde tanımlanır. Standartlarda tanımlanmış kalibrasyon periyotları hakkında bilgiler bir sonraki bölümde daha detaylı olarak verilmiştir.

Kalibrasyon işlemi 'kurum içi' ya da 'dış sağlayıcı, taşeron' ile mi yapılmalı?

Uygun uzman ve cihazlarla kalibrasyonlar bir dış laboratuvara cihazları göndermeden kullanıcı tarafından başarılı bir şekilde yapılabilir. Ancak, şirket içi bir kalibrasyon sistemi kurulması ve eğitimler ile gerekli yetkinliğin kazanılması önemli yatırım gerektirebilir. Bu konuda uzman bir dış sağlayıcı laboratuvardan hizmet almak genellikle daha iyidir ve daha uygun olacaktır.

Kalibrasyon işlemi yerinde mi veya laboratuvarda mı yapılmalı?

Bir cihazın kalibrasyonu için ideal bir ortam genellikle kontrollü belirli bir referans koşulları ile uygun kalibrasyon cihazlarına sahip bir laboratuvarda temin edilebilir. Ancak, cihazları monte edildiği yerden sökmek için veya tam kullanım koşulları altında kalibre ettirebilmek için yerinde kalibrasyon yaptırmak gerekli olabilir. Kullanıcının cihazın kalibrasyon standardında tanımlandığı şekilde hareket etmesi tavsiye edilir.

Tüm sistemin mi veya sadece dönüştürücünün mü kalibrasyonu yapılmalı?

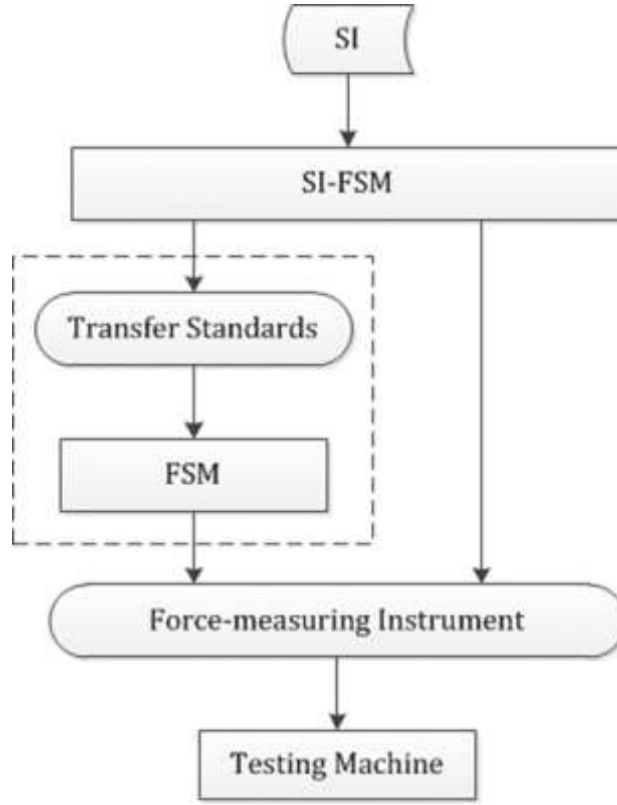
Normalde dönüştürücünün, aynı kablo, aynı gösterge ünitesi ve aynı güç kaynakları kullanarak tüm ölçüm zincirini kalibre etmek en doğru sonucu sağlar. Bazen dönüştürücü ve gösterge cihazlarının izlenebilir standartlarında ayrı kalibre edilmesi durumu olabilir ama bu durum zorunlu hallerde uygulanmalıdır.

Ayar işlemi nasıl yapılmalıdır?

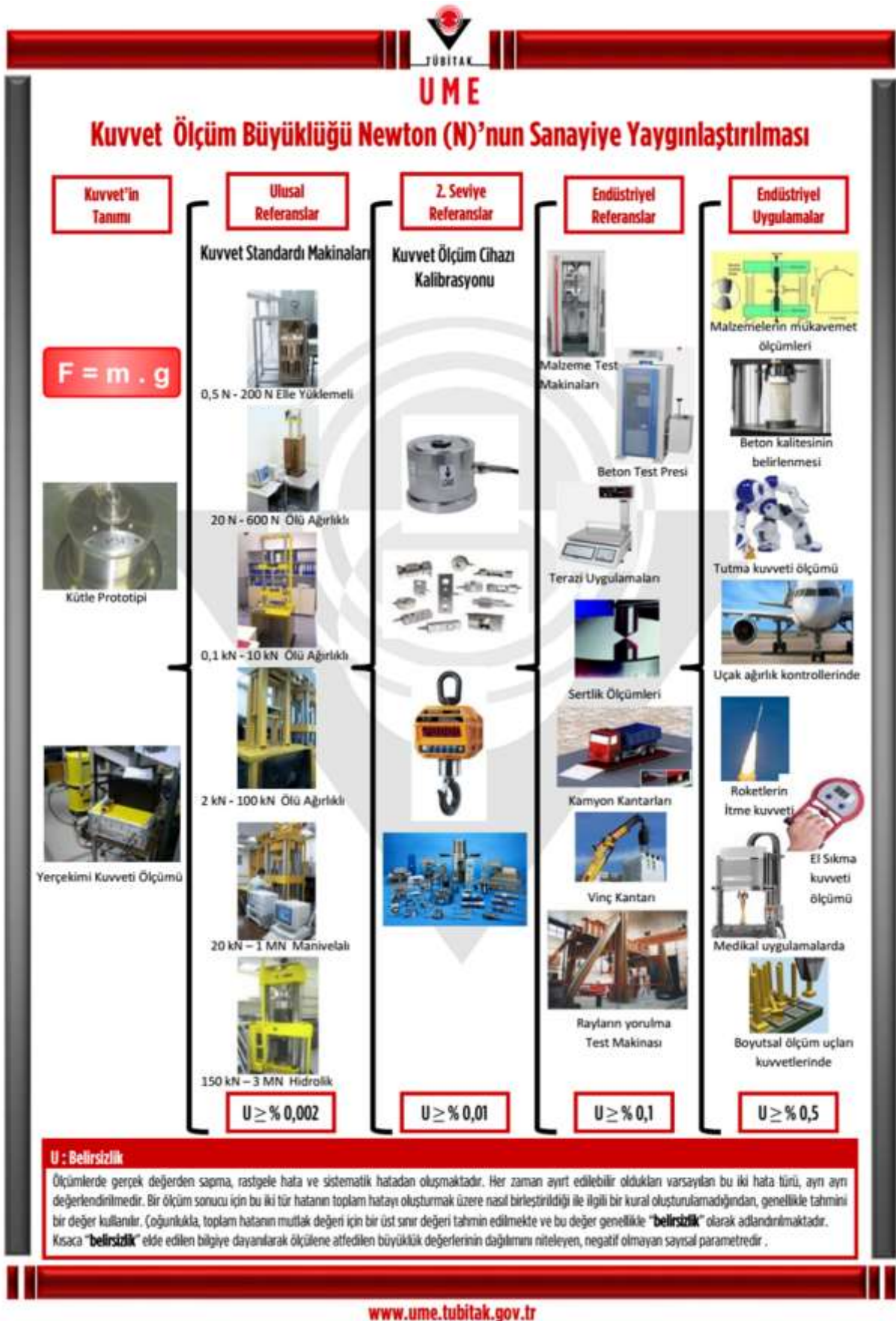
Kalibrasyon, bazen "doğru okumak için bir cihazın ayarı" olarak anlaşılır. Bu doğru değildir. Kalibrasyon ve ayar ayrı kavramlardır ve ikisi karıştırılmamalıdır. Bazı kuvvet ölçüm sistemlerinin ayar yapılabilmesi mümkün olabilir. Eğer cihazda bir ayar yapılıyorsa kalibrasyon sertifikasında ayar öncesi ve ayar sonrası değerlerinin verilmesi gereklidir. Ayar yapılan cihazın ayar öncesi ve ayar sonrası değerlerindeki değişim bilgisi kuvvet ölçüm sürecinin izlenebilirliği için hayati olabilir.

Kuvvet biriminin izlenebilirlik zinciri nasıldır?

Kuvvet alanında uluslararası birim sistemine (SI) göre izlenebilirliği Şekil 7’de gösterildiği gibidir. Ulusal metroloji enstitülerin gerçekleştirdiği kuvvet standartları kullanılarak ülke içinde ikincil seviye kalibrasyon laboratuvarlarına ve endüstri laboratuvarlarına tüm kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonlarını yaparak kuvvet biriminin endüstriye yaygınlaştırılması gerçekleştirilir. Ülkemizde TÜBİTAK UME kuvvet ölçümlerinde 0,5 N dan 3 MN kapasiteye kadar % 0,002 ile % 0,04 belirsizlik aralığında değerler ile aktararak uluslararası geçerliliğe sahip akredite belgelendirme işlemleri yapmaktadır (Şekil 8).



Şekil 7. Uluslararası birim sistemine göre kuvvetin izlenebilirliği



Şekil 8. Kuvvet ölçüm büyüklüğünün sanayiye yaygınlaştırılması

Gereken ölçüm belirsizliği değeri nedir?

Kuvvet ölçüm sisteminin kalibrasyon ve kullanımında, belirsizlik seviyesinin göz önünde bulundurulması gerekir. Belirsizlik, söz konusu ölçüm için bütün belirsizlik kaynaklarının bir kombinasyonudur. Belirsizlik değerini elde etmek için belirsizlik kaynaklarının karelerinin toplamının karekökü alınarak belirlenir. Kapsam faktörü genellikle $k=2$ (% 95 güven düzeyi için) ile toplam belirsizlik değeri çarpılarak genişletilmiş ölçüm belirsizliği değeri belirlenir.

Kuvvet ölçüm sisteminin kalibrasyon için gerekli belirsizlik düzeyi kullanıcı tarafından belirlenebilir. İhtiyaçlar uygulamaya bağlıdır ve yasal düzenleme (örneğin, sağlık ve güvenlik gibi) veya özel sektörde süreçlere (proses kontrol gibi) göre tanımlanabilir. Kalibrasyonun bu ihtiyaçları karşılamak için yeterli olması gerekir. Genel bir yaklaşım olarak, kalibrasyon cihazının ölçüm belirsizliği kalibre edilen sisteminkinden 3 kat veya daha iyi olmalıdır. Örneğin, kalibre edilen kuvvet belirsizliğinin % 3 olması istenen bir sistemde referans kuvvet dönüştürücünün belirsizliği % 1 veya daha küçük olmalıdır. Kuvvet ölçümleri için belirsizlik hesaplarının detayları EURAMET cg-04 dokümanında verilmiştir. Kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 376 standardına göre gerçekleştirilen kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, bu teknik dokümana göre belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır. EURAMET cg-04, “Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik” rehber dokümanında kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan her bir bağıl belirsizlik ($w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8$) bileşeninin alabileceği üst sınırları kullanılarak EN ISO 376 standardının sınıflarına göre belirlenebilecek bağıl genişletilmiş belirsizlik değerleri değişimi aşağıda Tablo 7’de verilmiştir. Tablodaki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

- w_1 : Uygulanan kuvvetin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_2 : Kalibrasyon sonuçlarının yeniden üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_3 : Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_4 : Gösterge çözünürlüğünün bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_5 : Kuvvet ölçme cihazının sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_6 : Kuvvet ölçme cihazının sıfır değerindeki kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_7 : Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_8 : Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

Tablo 7. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna etki eden bağıl belirsizlik bileşenlerinin üst sınırları kullanılarak belirlenen EN ISO 376 standardının sınıflarına göre bağıl belirsizlik değişimi

Sınıf	w_1 (%)	w_2 (%)	w_3 (%)	w_4 (%)	w_5 (%)	w_6 (%)	w_7 (%)	w_8 (%)	Bağıl Genişletilmiş Belirsizlik
00	0,005	0,017	0,014	0,010	0,014	0,012	0,000	0,025	0,08
0,5	0,010	0,033	0,029	0,020	0,029	0,025	0,000	0,050	0,16
1	0,025	0,067	0,058	0,041	0,058	0,050	0,000	0,100	0,32
2	0,050	0,133	0,115	0,082	0,115	0,100	0,000	0,200	0,64

Kuvvet çalışma aralığı ve yönü nedir?

Cihaz çalışma aralığına uygun olarak kalibre edilmesi gereklidir. Bir kuvvet ölçme cihazı genellikle kapasitesinin % 20 ile % 100 arasında kalibre edilir. Eğer cihaz bu aralık dışında ölçümler için kullanılıyorsa kullanıldığı kuvvet değerlerine uygun olarak ilave ölçüm veya ilave kalibrasyon yapılabilir. Cihaz kullanım yerinde maruz kuvvetin yönüne göre çekme, basma veya her iki yönlü olarak kalibre edilebilir.

Kalibrasyon sıcaklık aralığı ne olmalıdır?

Kuvvet dönüştürücü mümkün olduğunca çalışma sıcaklık aralığında kalibre edilmelidir. Kalibrasyon işleminde sıcaklık etkileri belirsizlik hesaplarında dikkate alınır.

2.7. Kalibrasyon Sertifikası

TS EN ISO/IEC 17025:2018 standardının madde “7.8 Sonuçların raporlanması” ana başlağı altında genel olarak, sonuçlar yayımlanmadan önce gözden geçirilmesi gerekliliğı ve yetkilendirilmelerin olması gerekliliğı belirtilmiştir. Sonuçlar doğru, açık, kesin ve tarafsız bir şekilde, genellikle bir raporda sunulmalı (deney raporu, bir kalibrasyon belgesi veya numune alma raporu) ve müşteriyle anlaşılan ve sonuçların yorumlanması için gerekli tüm bilgilerle birlikte kullanılan yöntemin gerektirdiğı tüm bilgileri verilmelidir. Yayımlanan bütün raporların teknik kayıt olarak saklanması ifade edilmiştir. Standardın “7.8.2 Raporlar için ortak gereklilikler” kısmında olması gereken bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

- a) başlık (“Deney Raporu”, “Kalibrasyon Belgesi” veya “Numune Alma Raporu”),
- b) laboratuvarın adı ve adresi,
- c) müşterinin tesisi veya laboratuvarın sabit tesislerinin dışındaki yerler veya ilişkili olan geçici veya gezici tesisleri dâhil, laboratuvar faaliyetlerinin gerçekleştirildiğı yer,
- d) Bir rapor bütünün parçası olarak bütün bileşenlerinin özgün bir şekilde tanımlaması ve sonunun açıkça belirtilmesi,
- e) müşterinin adı ve iletişim bilgileri,
- f) kullanılan yöntemin tanımlanması,
- g) açıklama, kesin bir tanımlama ve gerekli olduğu hâllerde ögenin durumu,
- h) deney sonuçlarının geçerliliğı ve uygulanması için önemli olduğu yerlerde deney ve kalibrasyon malzemelerinin kabul tarihi ya da numune alma tarihi,
- i) laboratuvar faaliyetlerinin gerçekleşme tarihi/tarihleri,
- j) raporun yayım tarihi,
- k) deney sonuçlarının geçerliliğı ve uygulanmasıyla ilgili olmaları durumunda, laboratuvar ya da diğer kurumlar tarafından kullanılan numune alma planına ve yöntemine yapılan atıf,
- l) sonuçların sadece deneyi yapılan, kalibrasyonu yapılan veya numunesi alınan malzemelerle ilgili olduğuna dair bir açıklama,

- m) sonuçlar, uygun olduğu durumda ölçüm birimleriyle birlikte,
- n) deney yöntemine eklemeler, yöntemden sapmalar veya ayırmalar,
- o) raporu onaylayan kişinin/kişilerin kimliği,
- p) sonuçların dış tedarikçilerden gelmesi durumunda açık bir şekilde tanımlaması gerekliliği verilmiştir.

Ayrıca bunlara ek olarak, kalibrasyon belgeleri aşağıdakileri içermelidir:

- a) ölçülen büyüklükle aynı birimde ya da ölçülen büyüklükle ilgili bir ifade olarak (örn. yüzde olarak) sonuca ait ölçüm belirsizliği,
- b) ölçüm sonuçlarına etkisi olacak kalibrasyonların yapıldığı şartlar (örn. çevresel),
- c) ölçümlerin metrolojik olarak izlenebilirliğini tanımlayan bir beyan,
- d) mevcutsa, herhangi bir ayarlama veya onarım öncesi veya sonrasındaki sonuçlar,
- e) ilgili olduğu yerlerde, şartlara ya da şartnameye uygunluk beyanı,
- f) uygun olduğu yerlerde, görüş ve yorumlar.

Bunların dışında, kalibrasyon sertifikasında olması gerekenler ilgili kalibrasyon standartlarında da tanımlanır. Bu bilgileri diğer bölümde bulabilirsiniz.

Kuvvet kalibrasyon sertifikası örnekleri Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Kullanıcı kalibrasyon sertifikasını aldığı anda yapacakları ile aşağıda özetlenen bazı noktaları dikkate alması tavsiye edilir.



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate



AB-0034-K
UME
G2KV-0071
06-20

Cihazın Sahibi / Adresi
Customer / Address : TÜBİTAK UME KUVVET LABORATUVARI
TUBITAK Gebze Yerleşkesi 41470 Gebze - KOCAELİ

İstek Numarası
Order No : 2020.00942

Makine / Cihaz
Instrument / Device : Kuvvet Ölçme Cihazı
Force-measuring Instrument

İmalatçı
Manufacturer : GTM

Tip
Type : +

Seri Numarası
Serial Number : 00367

Kalibrasyon Tarihi
Date of Calibration : 01.06.2020

Sayfa Sayısı
Number of Pages : 8

Tarih
Date : 17.06.2020

Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ
Enstitü Müdürü
Director

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanan birimlerle gerçekleştirilen ulusal ölçüm standartlarına kimliklendirilmiştir. TÜBİTAK UME, CPM sisteminde Karşılaştırmalı Tanıma Disiplinini (BIRA) temsil etmektedir. This calibration certificate complies with the standards, which define the units of measurement according to the International System of Units (SI). TÜBİTAK UME is a signatory of the CPM Mutual Recognition Arrangement (BIRA).

Bu sertifika, CPM tarafından hazırlanan Karşılaştırmalı Tanıma Disiplini (BIRA) ile CPM tarafından gerçekleştirilen kalibrasyonlar, BIRA kapsamında bir kalibrasyon enstitüsü, bir CPM biriminde kalibrasyon, enstitüler ve ölçüm laboratuvarları arasında gerçekleştirilen kalibrasyonlar için geçerlidir. This certificate is valid only for the calibration that are included in Appendix C of the BIRA document by the CPM. Under the BIRA, all participating institutions recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C for almost all (99.999%) cases.

Kalibrasyon laboratuvarı olarak faaliyet gösteren TÜBİTAK UME, TÜRKAK tarafından AB-0034-K numaralı akreditasyon sertifikası ile TS EN ISO/IEC 17025:2017 standardına göre akredite edilmiştir. TÜBİTAK UME, an accreditation laboratory, has been accredited by TÜRKAK according to TS EN ISO/IEC 17025:2017 with the accreditation number AB-0034-K. Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarını temin ettiği kurumlarda Akademi Akreditasyon Birliği (EAB) ile Çek Tarafı Anlaşması (MLA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile Karşılaştırmalı Tanıma Disiplini (BIRA) imzalamıştır. The Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is a signatory to the European Cooperation for Accreditation (EAB) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (BIRA) for the recognition of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, gerçekleştirilen ölçüm belirlenimleri ve kalibrasyon sonuçları bu sertifikada tanımlanan birimlerin birim tablosu ile açıklanmıştır. Measurement results, the measured measurement uncertainties and calibration results are given in the following table, which is part of this certificate.



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

NATIONAL METROLOGY INSTITUTE



AB-0034-K
UME
G2KV-0071
06-20

Makine / Cihaz
Instrument / Device : Kuvvet Ölçme cihazı, kuvvet dönüştürücüsünden başlayarak, gösterge elemanına kadar olan ve gösterge elemanını da kapsayan birliktir.

1. Kuvvet Dönüştürücü
Üretici : GTM
Çalışma Aralığı : (0 – 50) kN
Kuvvet Uygulama Yönu : Basma
Tip / Model : + / +
Seri Numarası : 00367
Ölçüm Prensipleri : Uzama Ölçerli

2. Gösterge Elemanı
Üretici : HBM
Çalışma Aralığı : ± 2.5 mV/V
Tip / Model : DMP41 / +
Seri No / Kanal No : 831513801 / 1
Ölçüm Prensipleri : Sayısal / +
Çözünürlük : 0,000001 mV/V

Kalibrasyonun Yapıldığı Yer
Location : TÜBİTAK UME

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi
Date of Receipt of the Device : 28.05.2020

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihaz(lar)
Reference(s) Used in Calibration

No	Cihaz Adı	Üretici Firma	Tip / Model	Seri No	İzlenebilirlik
1	Kuvvet Standartı Makinası	GTM	Ölü Ağırlıklı	K8M 110 / 95	Uluslararası (SI) Birimlere İzlenebilir

Kalibrasyon Yöntemi ve Prosedürü
Calibration Method and Procedure : Bu kalibrasyon, EN ISO 376:2011 ve ASTM E74:2018 standartlarına göre hazırlanan "Kuvvet Ölçme Cihazları Kalibrasyon Talimatı" na (TLM-05-G2KV-04-01) uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kopyalanıp çoğaltılamaz. İzinsiz ve mühlürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full extent with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14. 41470 Gebze / KOCAELİ T: +90 362 679 50 00 F: +90 362 679 50 02 www.ume.tubitak.gov.tr



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

NATIONAL METROLOGY INSTITUTE



AB-0034-K
UME
G2KV-0071
06-20

Çevre Şartları
Environmental Conditions : Sıcaklık : (20,9 ± 1,0) °C
Bağıl Nem : (45,4 ± 10,0) %rh

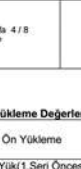
Kalibrasyon Sonuçları
Calibration Results

Sembolü	Birimi	Tanımı
F	kN	Standart kuvvet değeri
F_N	kN	Hesapla bulunmuş gerçek kuvvet değeri
X_N	mV/V	Dönüştürme göstergesinin ortalaması değeri
X_m	mV/V	Dönüştürme göstergesinin ortalaması değeri
X_N	mV/V	Maksimum kapasiteye karşılık gelen gösterge değeri
X_m	mV/V	Hesapla bulunmuş cihaz gösterge değeri
X	mV/V	Herhangi bir anda kuvvet ölçme cihazının göstergesinden okunan değer
f_N	mV/V	Kuvvet uygulandıktan sonraki gösterge değeri
f_m	mV/V	Kuvvet kalibrasyonundan sonraki gösterge değeri
$f_{N,0.02}$	mV/V	Maksimum kuvvet uygulandıktan veya kalibrasyondan 30 s sonraki gösterge değeri
$f_{N,300}$	mV/V	Maksimum kuvvet uygulandıktan veya kalibrasyondan 300 s sonraki gösterge değeri
$X_{N,0.02}$	mV/V	Artan kalibrasyon kuvvetlerindeki gösterge değerleri
$X_{N,300}$	mV/V	Azalan kalibrasyon kuvvetlerindeki gösterge değerleri
a	%	Bağıl sıfır hatası
b	%	Dönüştürme bağıl tekrarlanabilirlik hatası
b'	%	Dönüştürme bağıl tekrarlanabilirlik hatası
f	%	Bağıl enterpolasyon hatası
v	%	Bağıl temsil edilebilirlik hatası
c	%	Bağıl sınırlama hatası
W	%	Bağıl ölçüm belirsizliği

Basma Yönü
Gösterge Değerleri : Kuvvet Ölçme Cihazının Sıfır Değeri: 0,003398 mV/V

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kopyalanıp çoğaltılamaz. İzinsiz ve mühlürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full extent with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14. 41470 Gebze / KOCAELİ T: +90 362 679 50 00 F: +90 362 679 50 02 www.ume.tubitak.gov.tr



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

NATIONAL METROLOGY INSTITUTE



AB-0034-K
UME
G2KV-0071
06-20

Çevre Şartları
Environmental Conditions : Sıcaklık : (20,9 ± 1,0) °C
Bağıl Nem : (45,4 ± 10,0) %rh

Kalibrasyon Sonuçları
Calibration Results

Sembolü	Birimi	Tanımı
F	kN	Standart kuvvet değeri
F_N	kN	Hesapla bulunmuş gerçek kuvvet değeri
X_N	mV/V	Dönüştürme göstergesinin ortalaması değeri
X_m	mV/V	Dönüştürme göstergesinin ortalaması değeri
X_N	mV/V	Maksimum kapasiteye karşılık gelen gösterge değeri
X_m	mV/V	Hesapla bulunmuş cihaz gösterge değeri
X	mV/V	Herhangi bir anda kuvvet ölçme cihazının göstergesinden okunan değer
f_N	mV/V	Kuvvet uygulandıktan sonraki gösterge değeri
f_m	mV/V	Kuvvet kalibrasyonundan sonraki gösterge değeri
$f_{N,0.02}$	mV/V	Maksimum kuvvet uygulandıktan veya kalibrasyondan 30 s sonraki gösterge değeri
$f_{N,300}$	mV/V	Maksimum kuvvet uygulandıktan veya kalibrasyondan 300 s sonraki gösterge değeri
$X_{N,0.02}$	mV/V	Artan kalibrasyon kuvvetlerindeki gösterge değerleri
$X_{N,300}$	mV/V	Azalan kalibrasyon kuvvetlerindeki gösterge değerleri
a	%	Bağıl sıfır hatası
b	%	Dönüştürme bağıl tekrarlanabilirlik hatası
b'	%	Dönüştürme bağıl tekrarlanabilirlik hatası
f	%	Bağıl enterpolasyon hatası
v	%	Bağıl temsil edilebilirlik hatası
c	%	Bağıl sınırlama hatası
W	%	Bağıl ölçüm belirsizliği

Basma Yönü
Gösterge Değerleri : Kuvvet Ölçme Cihazının Sıfır Değeri: 0,003398 mV/V

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kopyalanıp çoğaltılamaz. İzinsiz ve mühlürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full extent with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14. 41470 Gebze / KOCAELİ T: +90 362 679 50 00 F: +90 362 679 50 02 www.ume.tubitak.gov.tr

TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ
NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 5 / 8
 Page

AB-0034-K
 UME
 G2KCV-0071
 06-20

BASMA YÖNÜ

Enterpolasyon Tablosu

Standart Kuvvet Değerlerine Karşılık Gelen Cihazın Hesaplanmış Gösterge Değerleri (kN – mV/V)

F / kN	X ₀ / (mV/V)	F / kN	X ₀ / (mV/V)	F / kN	X ₀ / (mV/V)	F / kN	X ₀ / (mV/V)
5.00	0.200449	16.50	0.660286	28.00	1.120661	39.50	1.581126
5.50	0.220056	17.00	0.680300	28.50	1.140680	40.00	1.601148
6.00	0.240063	17.50	0.700314	29.00	1.160698	40.50	1.621169
6.50	0.260070	18.00	0.720328	29.50	1.180717	41.00	1.641191
7.00	0.280078	18.50	0.740343	30.00	1.200737	41.50	1.661213
7.50	0.300086	19.00	0.760358	30.50	1.220756	42.00	1.681235
8.00	0.320095	19.50	0.780373	31.00	1.240775	42.50	1.701256
8.50	0.340104	20.00	0.800388	31.50	1.260795	43.00	1.721278
9.00	0.360113	20.50	0.820403	32.00	1.280815	43.50	1.741300
9.50	0.380123	21.00	0.840419	32.50	1.300835	44.00	1.761323
10.00	0.400132	21.50	0.860435	33.00	1.320855	44.50	1.781345
10.50	0.420142	22.00	0.880451	33.50	1.340875	45.00	1.801367
11.00	0.440153	22.50	0.900468	34.00	1.360895	45.50	1.821389
11.50	0.460164	23.00	0.920484	34.50	1.380916	46.00	1.841411
12.00	0.480175	23.50	0.940501	35.00	1.400936	46.50	1.861434
12.50	0.500186	24.00	0.960518	35.50	1.420957	47.00	1.881456
13.00	0.520197	24.50	0.980535	36.00	1.440978	47.50	1.901478
13.50	0.540209	25.00	1.000553	36.50	1.460999	48.00	1.921501
14.00	0.560221	25.50	1.020570	37.00	1.481020	48.50	1.941523
14.50	0.580234	26.00	1.040588	37.50	1.501041	49.00	1.961546
15.00	0.600247	26.50	1.060606	38.00	1.521062	49.50	1.981568
15.50	0.620260	27.00	1.080624	38.50	1.541083	50.00	2.001590
16.00	0.640273	27.50	1.100642	39.00	1.561105	50.50	2.021613

Yukarıdaki tablo "En Küçük Kareler Yöntemi" kullanılarak elde edilen "Eşitlik 1" yardımıyla oluşturulmuştur. Bu tablo, standart kuvvet değerlerine karşılık gelen hesapla bulunmuş gösterge değerlerini gösterir. İstenildiği takdirde cihaz gösterge değerleri kullanıcı tarafından da hesaplanabilir. Bunun için herhangi bir standart kuvvet değeri ve aşağıda verilen a₁, b₁, c₁ katsayıları kullanılıp bu eşitlikte yerine konularak hesaplanabilir.

Eşitlik 1

$$X_a = a_1 F + b_1 F^2 + c_1 F^3$$

a₁ = 4,00060468E-02 (mV/V) / kN
 b₁ = 7,69320021E-07 (mV/V) / kN²
 c₁ = -5,08171344E-09 (mV/V) / kN³

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kimsenin kopyalaması, imzası ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Genel Yönetim Kurulu / TÜRKEİ 1-4632 07 10 00 1-4632 07 10 00 www.tubitak.gov.tr

TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ
NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 6 / 8
 Page

AB-0034-K
 UME
 G2KCV-0071
 06-20

BASMA YÖNÜ

Cihazın Gösterge Değerlerine Karşılık Gelen Hesaplanmış Standart Kuvvet Değerleri (mV/V – kN)

X / (mV/V)	F ₀ / kN	X / (mV/V)	F ₀ / kN	X / (mV/V)	F ₀ / kN	X / (mV/V)	F ₀ / kN
0.20	4.99878	0.86	16.49285	1.12	27.36348	1.58	39.47188
0.22	5.49881	0.88	16.99250	1.14	28.48303	1.60	39.97134
0.24	5.99843	0.70	17.49215	1.16	28.98256	1.62	40.47080
0.26	6.49824	0.72	17.99179	1.18	29.48208	1.64	40.97026
0.28	6.99804	0.74	18.49143	1.20	29.98160	1.66	41.46972
0.30	7.49784	0.76	18.99106	1.22	30.48112	1.68	41.96917
0.32	7.99763	0.78	19.49069	1.24	30.98063	1.70	42.46862
0.34	8.49740	0.80	19.99031	1.26	31.48014	1.72	42.96807
0.36	8.99718	0.82	20.48992	1.28	31.97965	1.74	43.46752
0.38	9.49694	0.84	20.98953	1.30	32.47915	1.76	43.96697
0.40	9.99669	0.86	21.48913	1.32	32.97865	1.78	44.46642
0.42	10.49644	0.88	21.98873	1.34	33.47815	1.80	44.96586
0.44	10.99618	0.90	22.48832	1.36	33.97764	1.82	45.46531
0.46	11.49591	0.92	22.98790	1.38	34.47713	1.84	45.96475
0.48	11.99564	0.94	23.48749	1.40	34.97662	1.86	46.46420
0.50	12.49536	0.96	23.98707	1.42	35.47610	1.88	46.96364
0.52	12.99507	0.98	24.48666	1.44	35.97558	1.90	47.46308
0.54	13.49477	1.00	24.98620	1.46	36.47506	1.92	47.96252
0.56	13.99447	1.02	25.48576	1.48	36.97454	1.94	48.46196
0.58	14.49416	1.04	25.98531	1.50	37.47401	1.96	48.96140
0.60	14.99384	1.06	26.48487	1.52	37.97348	1.98	49.46084
0.62	15.49351	1.08	26.98441	1.54	38.47295	2.00	49.96028
0.64	15.99316	1.10	27.48396	1.56	38.97242	2.02	50.45972

Yukarıdaki tablo "En Küçük Kareler Yöntemi" kullanılarak elde edilen "Eşitlik 2" yardımıyla oluşturulmuştur. Bu tablo, kuvvet ölçme cihazının gösterge değerlerine karşılık gelen hesapla bulunmuş gerçek kuvvet değerlerini gösterir. İstenildiği takdirde gerçek kuvvet değerleri kullanıcı tarafından da hesaplanabilir. Bunun için herhangi bir gösterge değeri ve aşağıda verilen a₂, b₂, c₂ katsayıları kullanılıp bu eşitlikte yerine konularak hesaplanabilir.

Eşitlik 2

$$F_a = a_2 X + b_2 X^2 + c_2 X^3$$

a₂ = 2,49962167E+01 kN / (mV/V)
 b₂ = -1,20009707E-02 kN / (mV/V)²
 c₂ = 1,58182588E-03 kN / (mV/V)³

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kimsenin kopyalaması, imzası ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Genel Yönetim Kurulu / TÜRKEİ 1-4632 07 10 00 1-4632 07 10 00 www.tubitak.gov.tr

TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ
NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 7 / 8
 Page

AB-0034-K
 UME
 G2KCV-0071
 06-20

Ölçüm Belirsizliği
Measurement Uncertainty

Ölçüm belirsizlik değerleri (U), EN ISO 376:2011 ve ASTM E74:2018 standartlarına göre Durum A, Durum B, Durum C ve Durum D için aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Ölçüm Noktaları	Bağıl Belirsizlik Değerleri, W (%)				
	Durum A	Durum B	Durum C	Durum D	ASTM E74
5 kN	0.029	0.036	0.030	0.037	0.014
10 kN	0.030	0.033	0.031	0.033	0.006
15 kN	0.010	0.016	0.010	0.017	0.005
20 kN	0.006	0.008	0.007	0.009	0.004
25 kN	0.006	0.006	0.006	0.007	0.004
30 kN	0.006	0.008	0.006	0.008	0.003
35 kN	0.006	0.007	0.006	0.007	0.003
40 kN	0.006	0.006	0.006	0.006	0.003
45 kN	0.006	0.006	0.006	0.006	0.003
50 kN	0.006	0.006	0.007	0.006	0.003

Sertifika verilen ölçüm belirsizliği değerleri EN ISO 376:2011 ve ASTM E74:2018 standartlarında verilen belirsizlik bileşenlerini içerir. Ayrıca, çözünürlük farklılıkları, tersinebilirlik, uzun dönem kararlılık, sıcaklık farklılıkları, yüklemeye parçalarının farklılığı, eksen kaçıklıkları, yüklemeye koşulu farklılıkları, kalibrasyon denkleminde farklı yaklaşımlar, farklı gösterge kullanımı ve dinamik kuvvet etkilerini içermemektedir.

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart ölçüm belirsizliğinin normal dağılım için yaklaşık % 95 güvenirlilik seviyesini sağlayan k = 2 kapsama faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Görüşler, Açıklamalar ve Uygunluk Beyanı
Comments, Remarks and Statement of Compliance

Bu kuvvet ölçme cihazının gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde, elde edilen ölçüm sonuçları ve EN ISO 376:2011'de belirtilen değerlere göre; basma, çekme yönünde Durum A, Durum B, Durum C, Durum D'ye ve ASTM E74:2018'e göre sınıflandırma tablosu aşağıda verilmiştir.

Ölçüm Aralığı	Durum A (b, b', f _s , c) kriterlerine göre sınıfı	Durum B (b, b', f _s , v) kriterlerine göre sınıfı	Durum C (b, b', f _s , f _c , c) kriterlerine göre sınıfı	Durum D (b, b', f _s , f _c , v) kriterlerine göre sınıfı	ASTM E 74 standartına göre sınıfı
5 kN - 50 kN	00	00	00	00	AA
10 kN - 50 kN	00	00	00	00	AA
15 kN - 50 kN	00	00	00	00	AA
20 kN - 50 kN	00	00	00	00	AA
25 kN - 50 kN	00	00	00	00	AA

Sınıf değerlendirilmesinde, basit karar kuralı uygulanmış olup, belirsizlik değeri dikkate alınmamıştır.

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kimsenin kopyalaması, imzası ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Genel Yönetim Kurulu / TÜRKEİ 1-4632 07 10 00 1-4632 07 10 00 www.tubitak.gov.tr

TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ
NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 8 / 8
 Page

AB-0034-K
 UME
 G2KCV-0071
 06-20

Kalibrasyon

Kalibrasyon sonuçları sadece kalibrasyonda yapılan Kuvvet Ölçme Cihazına aittir. Cihazın performansı için gerekli çevre şartlarında kullanımdan ve uygun araçlarla kalibre edilmesinin sağlanmasından kullanıcı sorumludur.

Kalibrasyonu Yapan(lar) *	Laboratuvar Sorumlusu *
Electronically By	Head of the Laboratory
Cemal VATAN	Doç. Dr. Bülent AYDEMİR
Uluk KURU	

* Elektronik olarak onaylanmıştır.
Approved electronically.

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kimsenin kopyalaması, imzası ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Genel Yönetim Kurulu / TÜRKEİ 1-4632 07 10 00 1-4632 07 10 00 www.tubitak.gov.tr

Şekil 9. Kuvvet ölçme cihazı örnek kalibrasyon sertifikası



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ



Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Çiğazın Sahibi / Adresi
Customer / Address:

İstek Numarası
Order No:

Makine / Cihaz
Instrument / Device:

İmalatçı
Manufacturer:

Tip
Type:

Seri Numarası
Serial Number:

Kalibrasyon Tarihi
Date of Calibration:

Sayfa Sayısı
Number of Pages:

TÜBİTAK UME KUVVET LABORATUVARI
TUBITAK Gebze Yerleşkesi 41470 Gebze - KOCAELİ

2019.02612

Malzeme Test Makinesi
Material Testing Machine

Zwick

Z250

156275/2002

10.01.2020

4



Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimlerle gerçekleştirilen ölçüm standartlarına istinaden hazırlanmıştır. TÜBİTAK UME, CPM resmî olarak Karşılaştırmalı Tanıma Disiplininde (SRM) tarafidir kuruluştur.

This calibration certificate documents traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). TÜBİTAK UME is a signatory to the CPM Mutual Recognition Arrangement (SRM).

Kalibrasyon laboratuvarı olarak faaliyet gösteren TÜBİTAK UME, ISO/IEC 17025:2017 standardına göre akredite edilmiştir.

TÜBİTAK UME, as a calibration laboratory, has been accredited by TÜRKAK according to ISO/IEC 17025:2017 with the accreditation number AB-0034-K.

Türk Akademi Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarını tanımlanmış birimlerde Avrupa Akademi Kurumu (EA) ile Çok Taraflı Anlaşma (MLA) ve Uluslararası Laboratuvar Akademi Kurumu (ILAC) ile Karşılaştırmalı Tanıma Disiplini (SRM) ile imzalamıştır.

The Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is a signatory to the European Cooperation for Accreditation (EA) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (SRM) for the recognition of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, gerçekleştirilen ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikadan tamamıyla bağımsız olarak takip edilen sayfa(lar)da verilmektedir.

Measurement results, the expanded measurement uncertainties and calibration methods are given on the following pages, which are part of this certificate.

19.02.2020
Tarih
Date

Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ
Enstitü Müdürü
Director

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.

This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14 40700 Gebze / TÜRKİYE | T: +90 362 075 91 00 | F: +90 362 075 91 00 | www.ume.tubitak.gov.tr



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ



NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 2 / 4
Page

AB-0034-K
UME
G2KV-0002
01-20

Makine / Cihaz
Instrument / Device:

Cihaz Adı
Device Name:

Üretici Firma
Manufacturer:

Çalışma Aralığı
Working Range:

Tip / Model
Type / Model:

Seri No
Serial No:

Kuvvet Uygulama Yöntemi
Force Application Method:

Malzeme Test Makinesi
Material Testing Machine

Zwick

(0 - 250) kN

Z250 / --

156275/2002

Basma

Malzeme Test Makinesine Ait Kuvvet ve Hareketli Tahta Ölçme Sisteminin Özellikleri

Sıra No	Cihaz Adı	Üretici Firma	Çalışma Aralığı	Tip / Model	Seri No
1	Kuvvet Ölçme Ölçer	GTM	(0 - 250) kN	-- / --	85516
2	Gösterge Elemanı (*)	Zwick	--	TestXpert V0.01 / --	--

(*) Malzeme Test Makinesine Ait Gösterge Elemanının Çözünürlüğü: 0.001 kN'dır.

Kalibrasyonun Yapıldığı Yer
Location:

TÜBİTAK UME

Çiğazın Laboratuvara Kabul Tarihi
Date of Receipt of the Device:

13.01.2020

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihaz(lar)
Reference(s) Used in Calibration:

No	Cihaz Adı	Üretici Firma	Tip / Model	Seri No	İzlenebilirlik
1	Referans Kuvvet Ölçer	MBM	Z4 / --	G72035	UME, G2KV-0135 04.09.2019
2	Gösterge	GTM	LT - Digital	90671	

Kalibrasyon Yöntemi ve Prosedürü
Calibration Method and Procedure:

Malzeme test makinesinin kuvvet ölçme sisteminin doğrulanması ISO 7500-1:2018 standardına göre hazırlanan "Malzeme Test Makinesi Kalibrasyon Talimatı" na (TLM-05-G2KV-04-02) uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.

This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14 40700 Gebze / TÜRKİYE | T: +90 362 075 91 00 | F: +90 362 075 91 00 | www.ume.tubitak.gov.tr



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ



NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 3 / 4
Page

AB-0034-K
UME
G2KV-0002
01-20

Çevre Şartları
Environmental Conditions

Sıcaklık
Temperature:

(21,1 ± 2,0) °C

Kalibrasyon Sonuçları
Calibration Results

Sembol	Birimi	Açıklama
F_N	kN	Nominal kuvvet değerleri
$F_{1,2,3}$	kN	Malzeme test makinesine ait her kuvvet serisi için artan yöndeki gösterge değerleri
$F_{UTM, Ortalama}$	kN	Malzeme test makinesine ait gösterge kuvvet değerlerinin ortalaması
$F_{REF, Ortalama}$	kN	Referans kuvvet ölçme cihazına ait kuvvet değerlerinin ortalaması
$X_{1,2,3}$	kN	Referans kuvvet ölçme cihazına ait gösterge değerleri
q	%	Malzeme test makinesine ait kuvvet ölçme sisteminin bağlı doğruluk hatası
b	%	Malzeme test makinesine ait kuvvet ölçme sisteminin bağlı tekrarlanabilirlik hatası
a	%	Malzeme test makinesine ait kuvvet ölçme sisteminin bağlı çözünürlük hatası
f_0	%	Malzeme test makinesine ait kuvvet ölçme sisteminin bağlı sıfır hatası
S_u	%	Ölçümün yapıldığı ortamdaki sıcaklık farkından kaynaklanan bağlı hata
U	%	Malzeme test makinesine ait kuvvet ölçme sisteminin bağlı ölçüm belirsizliği

Kuvvet Doğrulaması
50 kN Kapasitede Basma Yöntünde Kuvvet Uygulanması Durumunda;

Malzeme Test Makinesine ve Referans Kuvvet Ölçme Cihazına Ait Gösterge Değerleri

Kuvvet Değerleri	1. Artan Seri		2. Artan Seri		3. Artan Seri	
	F_1	X_1	F_2	X_2	F_3	X_3
0,0	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000
2,0	2,037	2,0350	2,245	2,2430	2,171	2,1711
5,0	5,062	5,0572	5,209	5,2050	5,075	5,0705
10,0	10,080	10,0675	10,014	10,0016	10,062	10,0479
15,0	15,039	15,0155	15,051	15,0275	15,018	14,9943
20,0	20,029	19,9939	20,023	19,9887	20,024	19,9894
25,0	25,019	24,9760	25,051	25,0076	25,023	24,9795
30,0	30,044	29,9873	30,056	29,9993	30,267	30,2080
35,0	35,038	34,9718	35,045	34,9783	35,035	34,9655
40,0	40,063	39,9890	40,023	39,9462	40,009	39,9307
50,0	50,085	49,9927	50,012	49,9183	50,072	49,9764
0,0	0,001	0,0000	0,004	0,0000	0,003	0,0000

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.

This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14 40700 Gebze / TÜRKİYE | T: +90 362 075 91 00 | F: +90 362 075 91 00 | www.ume.tubitak.gov.tr



TÜBİTAK
ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ



NATIONAL METROLOGY INSTITUTE

Sayfa 4 / 4
Page

AB-0034-K
UME
G2KV-0002
01-20

Malzeme Test Makinesine Ait Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kuvvet Değerleri	$F_{UTM, Ortalama}$	$F_{REF, Ortalama}$	q	a	S_u	f_0	b	U
kN	kN	kN	%	%	%	%	%	%
2,0	2,151	2,150	0,06	0,05			0,10	0,16
5,0	5,115	5,111	0,09	0,02			0,02	0,16
10,0	10,052	10,039	0,13	0,01			0,02	0,16
15,0	15,036	15,012	0,16	0,01			0,00	0,16
20,0	20,025	19,991	0,17	0,00			0,00	0,16
25,0	25,031	24,988	0,17	0,00	0,00	0,01	0,00	0,16
30,0	30,122	30,065	0,19	0,00			0,01	0,16
35,0	35,039	34,972	0,19	0,00			0,01	0,16
40,0	40,032	39,955	0,19	0,00			0,01	0,16
50,0	50,056	49,962	0,19	0,00			0,01	0,16

Ölçüm Belirsizliği
Measurement Uncertainty:

50 kN Kapasite ve Basma Yöntü için Ölçüm Belirsizliği

Malzeme test makinesinin belirsizliği % ($q \pm U$) olarak, % (0,19 ± 0,16)'dır. Bu değer, kuvvet ölçüm sisteminin (2 - 50) kN arasındaki kuvvet değerleri için geçerlidir.

Bayan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart ölçüm belirsizliğinin normal dağılım için yaklaşık % 95 güvenlilik seviyesini sağlayan $k = 2$ kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Görüşler, Açıklamalar ve Uygunluk Beyanı
Comments, Remarks and Statement of Compliance:

Malzeme test makinesine ait kuvvet ölçme sisteminin, ISO 7500-1:2018 standardına uygun olarak gerçekleştirilen doğruluğunun kontrolü neticesinde; (2 - 50) kN kuvvet aralığında ve basma yönünde sınıf: "0,5" olarak belirlenmiştir.

Kalibrasyon sonuçları sadece kalibrasyonu yapılan Malzeme Test Makinesine aittir. Cihazın performansı için gerekli çevre şartlarında kullanımdan ve uygun aralıklarla kalibre edilmesinin sağlanmasından kullanıcı sorumludur.

Kalibrasyonu Yapan(lar) *	Laboratuvar Sorumlusu *
Cemal VATAN	Doç. Dr. Bülent AYDEMİR
Ufuk KURU	

* Elektronik olarak onaylanmıştır.
Approved electronically.

Bu sertifika, TÜBİTAK UME'nin yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.

This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of TÜBİTAK UME. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi P.14 40700 Gebze / TÜRKİYE | T: +90 362 075 91 00 | F: +90 362 075 91 00 | www.ume.tubitak.gov.tr

Şekil 10. Malzeme test makinesi kuvvet ölçme sistemi örnek kalibrasyon sertifikası

İlk olarak cihazın bilgilerinin doğruluğu kontrol edilmelidir. Kalibrasyon yöntemi olarak verilen standart yöntemi de önemlidir. Örneğin kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu EN ISO 376 standardı, malzeme test makinası kuvvet ölçme sistemi kalibrasyonu ise EN ISO 7500-1 standardına uygun olabilir. Her iki standart cihazların hata değerlerine göre bir sınıflandırma yapılmasını zorunlu tutar ve bunun sertifikada belirtilmesini ister. Bu standartlara uygun yapılmış kalibrasyonlarda kalibrasyon sonucu hesaplanan cihazın sınıfının incelenmesi ve değerlendirilmesi gereklidir. Bunların dışında kuvvet kalibrasyon standartları da kullanılabilir. Bunların detayları diğer bölümde verilmiştir.

Kalibrasyonda kullanılan referans cihaz kalibre edilmiş veya izlenebilirliğinin bildirilmiş olması gereklidir.

Kalibrasyon sertifikasında verilen belirsizlik değeri kontrol edilmeli ve kullanıcının beklentilerini karşıladığı veya daha iyi olduğu kontrol edilmelidir.

Kalibrasyon öncesinde cihaza bir ayar yapıp yapılmadığı ve ayar yapılmış ise değerlerdeki değişim incelenmelidir.

Kalibrasyon tarihi ve gelecek kalibrasyon tarihi tahmini yapılarak kontrol edilmesi uygun olacaktır.

Kalibrasyon belgesi üzerinde tespit edilen veya beyan edilen herhangi bir uygunsuzluk, gözlemlenen farklı bir durum olup olmadığı incelenmelidir.

2.8. Kuvvet Ölçümünde Akreditasyon

Akreditasyon tanım olarak, laboratuvarların (kalibrasyon, deney ve belgelendirme kuruluşları) uluslararası kabul görmüş kriterlere göre değerlendirilmesi, onaylanması ve düzenli aralıklarla denetlenmesi ile bu kuruluşların fonksiyonel olarak birbirlerine denk olmasının sağlanmasıdır. Diğer bir ifade ile, belirli kalibrasyon veya deneyleri, laboratuvar tarafından beyan edilen belirsizlik değerleri içinde gerçekleştirmeye yeterli olduğunun, bağımsız bir organizasyon tarafından onaylanmasıdır. Akreditasyon, laboratuvarın, akreditasyon kapsamı dahilindeki kalibrasyon veya deneyleri gerçekleştirebilecek yeterlilikte olduğunun göstergesidir. Ancak, akreditasyon laboratuvar performansı veya laboratuvar tarafından gerçekleştirilen kalibrasyon veya deney sonuçlarının garantisi değildir.

Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) Türkiye’de akreditasyon için yetkilendirilmiş tek kurumdur. TÜRKAK’ın birçok ülkede benzerleri vardır ve birçok durumda tam olarak eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Resmi anlaşmalar ile farklı ulusal akreditasyon kurumlarının sertifikalarının karşılıklı tanınması sağlanmıştır.

Bir kuvvet kalibrasyonu yapan bir laboratuvar TS EN ISO/IEC 17025 standardına uygun olarak kalite sistemini oluşturup uygulamaya aldıktan sonra TÜRKAK'a başvuruda bulunabilir.

İlgili TÜRKAK prosedürlerini tamamladıktan sonra başarılı olarak değerlendirilirse 4 yıl geçerli olacak akreditasyon belgesini almaya hak kazanacaktır.

TÜRKAK'tan akredite olacak kuvvet kalibrasyon laboratuvarları için akreditasyon kapsamları TÜRKAK Rehber R20.26 uygun olarak oluşturulması gereklidir. Aşağıda bu rehberde verilen kuvvet kalibrasyonu kapsam örneği verilmiştir.

Tablo 8. R20.26 göre kuvvet kalibrasyonu kapsam örneği

Ölçüm Büyüklüğü/ Kalibre Edilen Cihazlar	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Şartları	Kalibrasyon ve Ölçüm Yeteneği (k=2)	Açıklamalar/ Kalibrasyon Metodu
Malzeme Test Makineleri Basma Test Makinesi	$200 \text{ kN} < F \leq 2 \text{ MN}$	1. sınıf yük hücresi ile basma	%0,32	F: Kuvvet, N TS EN ISO 7500-1, ISO 7500-1 ve ASTM E4 standartlarına uygun olarak hazırlanmış kalibrasyon prosedürü

Tablo 8'de laboratuvar, ölçüm aralığı sütununda en küçük ve en büyük ölçüm değerlerini verilen formata uygun olarak ve kuvveti "F" sembolü ile gösterir. Ayrıca, ölçüm şartlarında kuvvet ölçüm cihazının sınıfını belirtir. Ölçüm şartlarında belirtilen sınıf değerine göre en büyük belirsizlik değeri EURAMET cg-04, "Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik" rehber dokümanında her bir bağıl belirsizlik bileşeninin alabileceği üst sınırları kullanılarak EN ISO 376 standardının sınıflarına göre belirlenebilecek bağıl genişletilmiş belirsizlik değerleri (Tablo 7) kalibrasyon ve ölçüm yeteneği sütununda verilir. Bu sayede kuvvet ölçme cihazının sınıfı değişmeden bağıl genişletilmiş belirsizlik değerlerinde ufak değişiklikler olsa bile kapsamda beyan edilen değer daha büyük olduğundan her kalibrasyon sonrası kapsam değişikliğine gerek kalmayacaktır. Eğer kuvvet ölçme cihazının sınıf değeri değişirse kapsamdaki bağıl genişletilmiş belirsizlik değeri de değiştirilmelidir. Açıklamalar / Kalibrasyon metodu sütununda ise ilgili kalibrasyon standardı belirtilir. Örnek kuvvet kapsamı Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. TÜRKAK'ta verilmiş örnek kuvvet kalibrasyonu kapsamı

Ölçüm Büyüklüğü/ Kalibre Edilen Cihazlar	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Şartları	Kalibrasyon ve Ölçüm Yeteneği ($k=2$)	Açıklamalar/ Kalibrasyon Metodu
--	---------------	----------------	--	---------------------------------------

MALZEME TEST MAKİNALARI

Beton Test Makinesi Kuvvet: F	$200 \text{ kN} \leq F \leq 3000 \text{ kN}$	TS EN 12390-4	% 0,32	BASMA (1 Sınıfı yük hücresi ile)
Çekme Basma Test Makinesi Kuvvet: F	$1 \text{ N} \leq F \leq 1500 \text{ kN}$	TS EN ISO 7500-1 ASTM E4	% 0,16	ÇEKME (0,5 Sınıfı Y.H ile)
Kuvvet Ölçerler	$1 \text{ mN} \leq F \leq 50 \text{ N}$		% 0,10	ÇEKME (E2 Sınıfı kütle ile)
	$1 \text{ N} \leq F \leq 500 \text{ N}$		% 0,10	ÇEKME (F1 Sınıfı kütle ile)

KUVVET				EN ISO 376 ve ASTM E74 standartlarına göre.
Kuvvet, F	$10 \text{ N} \leq F \leq 100 \text{ kN}$		% 0,005	Ölölü ağırlıklı kuvvet kalibrasyon makinesi kullanılır. Gösterge cihazı (indikatör) ile birlikte Çekme ve/veya basma yönünde kalibre edilir.
Kuvvet dönüştürücü, Yük Hücresi, Ölçme Halkası, Dinamometre				F : Ölçülen değer

KAYNAKLAR

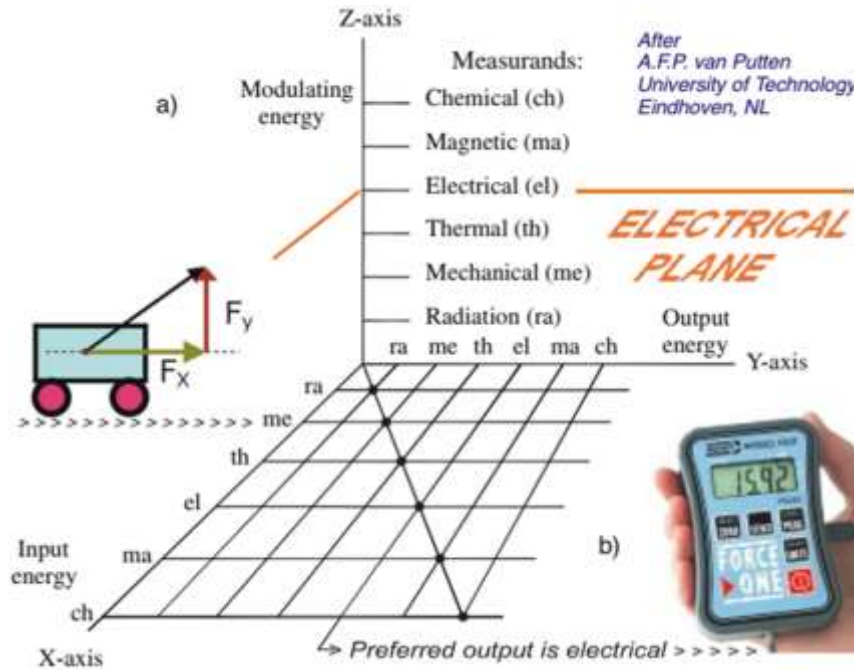
- [1]. Metroloji, 1. Basım, Şubat 2013, ISBN 978-975-403-731-9, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü
- [2]. GUM, JCGM 100, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", 2008
- [3]. EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European Accreditation, December 1999
- [4]. JCGM 200:2008, International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 2008
- [5]. TS EN ISO/IEC 17025, Deney ve kalibrasyon laboratuvarlarının yetkinliği için genel gereklilikler, 2017
- [6]. Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan, C., 2017, "Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı", TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018
- [7]. EURAMET CG-04, Uncertainty of Force Measurements Version 2.0, 2011
- [8]. Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C., 2015, EURAMET CG-04, Kalibrasyon Rehberi, "Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik" TÜBİTAK UME, Şubat 2015
- [9]. EN ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines
- [10]. ISO 7500-1:2018, Metallic Materials-Verification of Static Uniaxial Testing Machines Tension/Compression Testing Machines-Verification and Calibration of the Force-Measuring Systems
- [11]. TÜRKAK R20.26, Kalibrasyon Laboratuvarlarının Kapsam Sunum Kuralları İçin Rehber, 2019
- [12]. Kısaca metroloji, TÜBİTAK UME, 2008
- [13]. Uluslararası Metroloji Sözlüğü, TÜBİTAK UME, 2008
- [14]. ILAC G24, Ölçüm cihazlarının kalibrasyon aralıklarını belirlemeye yönelik rehber, 2007
- [15]. www.bipm.org
- [16]. www.turkak.org.tr
- [17]. TÜRKAK R10-12, Metrolojik İzlenebilirlik Rehberi, 2018
- [18]. TÜRKAK R20-18, TÜRKAK Markalı Deney Raporları ve Kalibrasyon Sertifikalarına İlişkin Rehber, 2019

3. KUVVET ÖLÇÜM VE KALİBRASYON CİHAZLARI

Kuvvet, cisimlerin hareket etme durumlarını, şekillerini ve basınçlarını değiştirebilen etki olarak tanımlanabilir. Tasarımların imalat aşaması, kalite kontrolü ve ürün testleri olmak üzere mühendislik çalışmalarının birçoğunda kuvvet uygulamaları yapılmaktadır. Bu durum da uygulanan kuvvetin büyüklüğünün doğru ölçülebilmesini önemli kılmaktadır.

Kuvvet, mekanik bir ölçektir ve uygulanması, belirli malzemelerin elektrik, manyetik, akustik ve/veya optik özelliklerini değiştirir. Ölçüm sistemleri ise bu anahtar bileşenleri, ölçüm prensiplerini veya yöntemlerini kullanabilen dönüştürücülerdir. Dönüştürücünün en uygun açıklaması fiziksel bir yaklaşımla verilebilir. Genel olarak kabul edilen fiziksel 6 sinyal alanı vardır: mekanik (akustik dâhil), termal, elektriksel, manyetik, radyan (optik) ve kimyasal olarak verilir (Şekil 3.1, 3.2). Bu sinyallere göre şekil 3.1'de bir 3D enerji alanı diyagramı verilmiştir. Burada:

- X eksenini giriş enerjisi etki alanını temsil eder. Ayarlanabilir bir dönüştürücü söz konusu ise, sadece gerekli yardımcı enerjiyi içerir. Kendi kendine sinyal üreten bir dönüştürücü durumunda ise, ona bağlı olan enerjiyi ve bilgiyi temsil eder.
- Y eksenini, çıkan bilgi içeriğinin olduğu çıkış enerjisi alanını temsil eder.
- Z eksenini, eğer yardımcı bir enerji kaynağı gerekiyorsa, gelen bilgilerin mevcut olduğu modülasyonlu (ayarlanabilir) enerji alanını temsil eder.

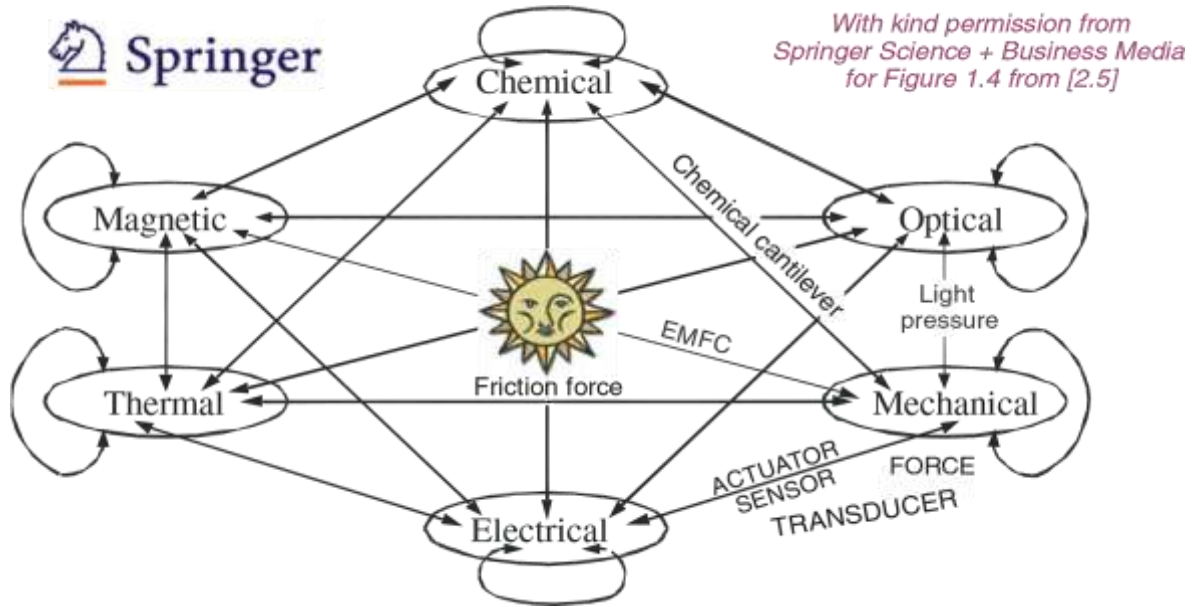


Şekil 3.1 a) Enerjik iletim sürecinin 3 boyutlu bir gösterimi (Dönüştürücülerin küpü),
b) Dijital sinyal çıkışına "aktarılmış" mekanik kuvvet girişi örneği

X-Y düzleminde (giriş-çıkış düzlemi de denir), 36 olasılıklı, kendinden üreteçli dönüştürücü bulunabilir. Ana çapraz yerleştirilmiş dönüştürücülerde, yani modifiye edicilerde (noktalar ile gösterilmiştir) enerji dönüşümü yoktur. Yalnızca enerji şekli dönüşümü gerçekleştirilir.

Bir küp tüm dönüştürücüleri temsil ediyorsa, Middelhoek tarafından hayal edildiği gibi bu küp içindeki her kutuda tam bir iletim sistemi tanımlanabilir. Bu kutu tarafından temsil edilen iletim işlemini gerçekleştirmek için çok çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal etkiler kullanılabilir. Pratikte, sadece bir elektrik çıkışı sunan cihazlar dönüştürücü olarak adlandırılır. Çünkü çoğu ölçüm sistemi elektrik sinyalini kullanır. Dijital bir kuvvet göstergesi elektrik çıkış dönüştürücüsüne bir örnektir (Fig. 3.1b).

Rosenberg & Karnopp (1983) ve Middelhoek & Hoogerwerf (1986) tarafından verilen tanımların ardından, bu alandaki en eksiksiz tanım Ilene Busch-Vishniac (1989) tarafından verilmiştir: Bir enerji çevirici, her iki enerji türünü, aynı alanda olsa bile (örneğin, çevirme hareketiyle dönüşünü değiştiren bir tekerlek) enerjiyi bir türden diğerine dönüştüren bir cihazdır; iki durum kapalı döngülerle temsil edilir (Şekil 3.2). Çoğunlukla bu süreç iki yönlüdür.



Şekil 3.2. Altı enerji alanının karmaşık etkileşimlerini ve temel enerjiler arasındaki dönüşümleri temsil etmek için konumlandırması.

Enerjik dönüşümün isimleri yukarıda belirtilen şekildeki bağlantı oklarına yazılmıştır. Bazı alt süreçler aşağıdaki bölümde açıklanırken sürtünme kuvveti verilmiştir. Elektromanyetik kuvvetin karşılığı (EMFC) prensibi ifade eder. James Clerk Maxwell, kuvvetli güneş ışığının kare mil üzerindeki basıncının yaklaşık 14.5 N olduğunu belirtmiştir.

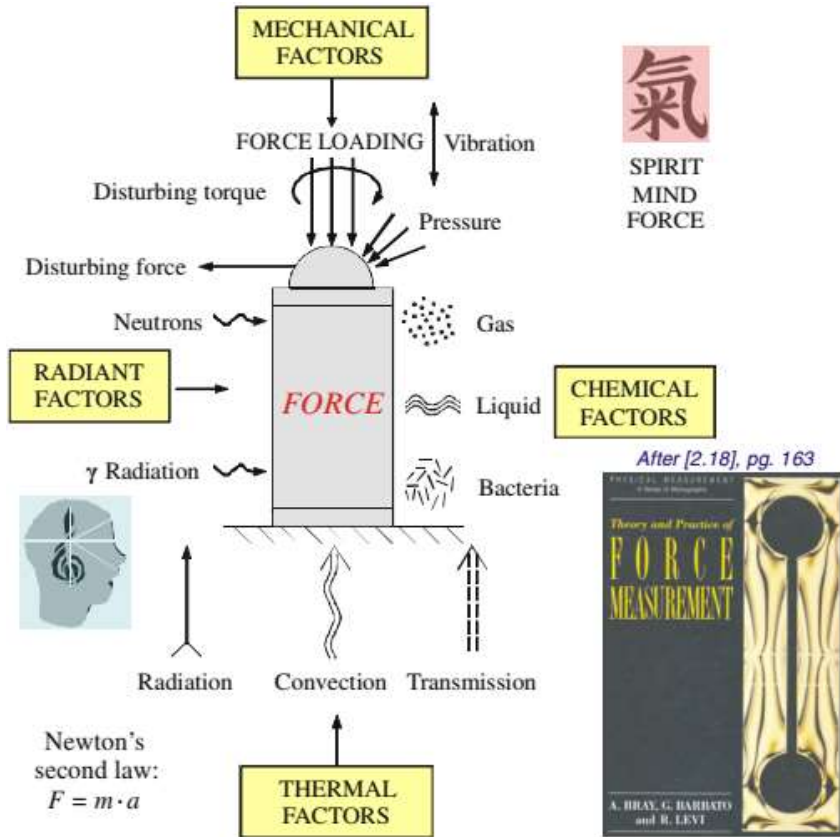
Mekanik enerji alanındaki en faydalı etkiler, Miller endeksleri ve kısa açıklamaları ile Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Gerçek ölçümlerde, bu etkiler daha karmaşık ve birbiriyle yakından bağlantılıdır.

Örneğin malzemelerin triboelektrik sürtünmesi termal etki yaratır ve aşağıda verilen uygulamalarda çok faydalıdır.

Tablo 3.1 Mekanik kuvvet alanında bazı etkiler ve kısa açıklamaları

Etki	Notasyonu	Makroskopik Açıklama
Piezodirençli	[el, el, me]	Mekanik bir kuvvet nedeniyle yarıiletkenlerin iletkenliğinde değişim.
Piezoelektrik	[me, el, 00]	Mekanik kuvvete bağlı yüzey yükünün oluşumu.
Triboelektrik	[me, el, 00]	Malzemelerin yüzey sürtünmesi nedeniyle pozitif veya negatif yükler oluşumu.
Akustoelektrik	[me, el, 00]	Hareket eden akustik dalga (SAW) ile bir elektrik akımının üretilmesi.
Termoelastik	[th, el, me]	Mekanik bir gerilime ve bu bölgelerdeki sıcaklık farkına bağlı olarak bir metalin iki bölgesinde gerilim üretimi.
Manyetoelastik	[me, ma, 00]	Manyetizasyonda mekanik kuvvetle değişim.
Piezooptik	[ra, ra, me]	Mekanik kuvvet nedeniyle kırılma indeksinde değişim.
Fotoelastik	[ra, ra, me]	Mekanik bir kuvvetle çift kırılma üretimi.

Herhangi bir kuvvet ölçüm sistemi, mekanik, kimyasal, termal ve radyasyon faktörleri tarafından ifade edilen çevresel etkileşimlere doğal olarak uygundur (Şekil 3.3).



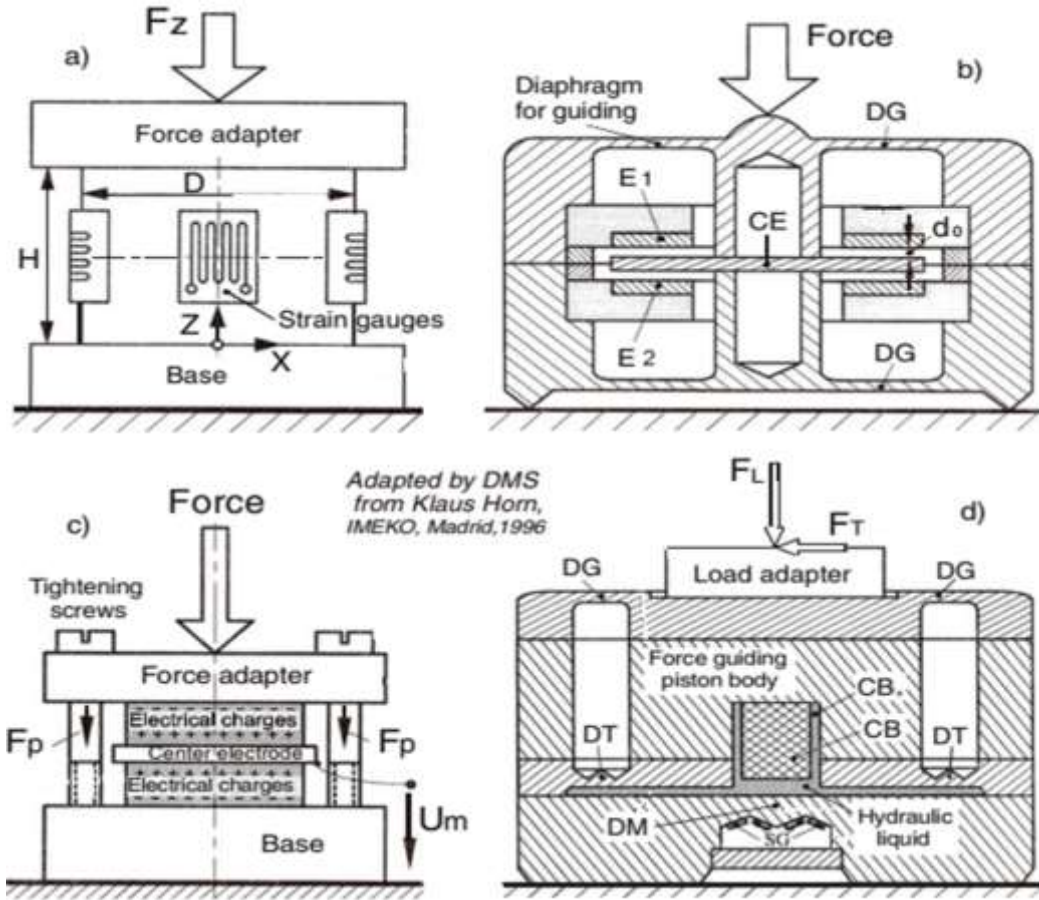
Şekil 3.3 Mekanik kuvvet ölçümlerinde parazit faktörler.

Radyasyonun termal veya iyonize olabileceği unutulmamalıdır. Mekanik, kimyasal, termal ve radyan faktörler etki faktörleri olabiliyorsa, elektriksel ve manyetik olayların mekanik kuvvet ölçümleri için yararlı olduğu sonucu çıkarılabilir.

Kuvvet Dönüştürücülerin Sınıflandırılması

Profesör Klaus Horn ve T.U. Braunschweig'in, fiziksel prensiplerin sistematizasyonunda ve kuvvetin ve basıncın elektriksel ölçümünde ortaya çıkan temel geometrik şekiller üzerinde çalışmaları vardır. Bir ölçüm uzmanı kişi, işlevsel prensipleri gereği, elastik elemanların şekilleri ve nominal yükleri nedeniyle, büyük miktarlarda ve çeşitli endüstriyel ve özelleştirilmiş ürünler ile karşılaşır. Karşılaşabileceği dört farklı kuvvet dönüştürücüsünün “standartlaştırılmış” gösterimine yönelik şekil ve açıklamaları aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.4)

- a) Yükten bağımsız bir F yükünün zamanında mı yoksa yüzeye dağıtılmış bir kuvvet olarak mı uygulandığından bağımsız olarak, kuvvet adaptörü olarak bir yük giriş elemanı kullanılır. Yükseklik H olarak alınırsa, Saint Venant'ın prensibine göre tasarlanmalıdır: $H > 5 D$. Bu şekilde, gerçekte uygulanan statik olarak eşdeğer bir kuvvetler sistemi, yükleme noktasından yeterince büyük bir mesafede aynı etkiye sahiptir.
- b) Bir kapasitif kuvvet dönüştürücüsü (FT), iki diferansiyel elektrotlu $E1$ ve $E2$ arasındaki diyaframlar DG tarafından yönlendirilen dairesel ve düz bir dairesel plaka olan hareketli bir merkez CE elektrotu içerir.
- c) Bir piezoelektrik FT'nin pratik olarak gerçekleştirilmesi için, ters polarizasyon ile ayarlanmış ve sıkma vidaları ile F_p kuvvetiyle ön yükleme kuvveti uygulanmış, $H < 0.3$ mm olan iki ince kuvars disk kullanır. Merkezi elektrot, iki dış elektrottan birisi sert kuvvet adaptörüne diğeri de taban elemanına bağlı iki plaka arasına yerleştirilir. Çıkış gerilimi U_m , uygulanan kuvvetin bir ölçüsüdür.
- d) Montajlı enerji transformatörleri tarafından bir enerji azaltma prosedürleri kullanılır. Bir kuvvet-basınç transformatörü, çok büyük bir dikey kuvvetin (F_L), içine bir kompresyon gövdesi (CB) ile birlikte küçük bir haznede düşük sıkıştırılabilirlikli bir hidrolik akışkanın ince bir tabakasında (0,3 mm) oluşturulan basınç p 'ye dönüştürülmesi için kullanılır. DG yönlendirilmiş diyafram olarak kullanılan esnek bir halkadır. DT ise transformatör diyaframıdır. DM de ölçüm diyafram olup alt kısımda dört uzama ölçerli (SG) bir zardır.



Şekil 3.4. Mekanik ve elektriksel yönleri ile kuvvet dönüştürücülerinin gösterimi, a) Sütunlu elastik eleman üzerine bağlanmış ve Wheatstone köprüsüne bağlı dört uzama ölçerli direnç kuvvet dönüştürücüsü (FT), b) Dairesel plakalar ile diferansiyel kapasitif FT, c) Piezoelektrik FT. d) Uzama ölçerli membrana dayanan hibrid hidrolik-elektrik FT.

Horn tarafından önerilen yedi tip kuvvet dönüştürücüsü Tablo 3.2'de verilmiştir. Tabloda RLC olarak verilen dönüştürücü aslında üç türü temsil eder: potansiyometre, endüktif bobin ve değişken kondansatördür. Yedi dönüştürücünün prensip şekilleri ve ana parametrelerinin kuvvet bağımlılığını belirten ilgili formüller tabloda ifade edilmiştir.

Tablo 3.2. Kuvvet dönüştürücüler için farklı ölçüm prensiplerinin gösterimi

Working principle	Vibrating wire	Gyro-dynamic	Force balance	Magneto-elastic	Acoustic (SAW)	RLC displacement	Metallic strain gauge
Symbolic layout							
Physical formula	$f \sim \sqrt{F/E}$	$\alpha \sim E$	$i \sim F$	$\mu \sim F$	$f \sim f_0(1 - \epsilon)$	$s \sim F/k$	$\Delta R/R \sim \epsilon \sim F$
Load range	< 1kg	< 10kg	< 1kg	0,1→1000t	< 10kg	1g→100t	1kg→1000t
Deflection [mm]	< 0,2	< 0,1	0	< 0,5	< 0,2	< 1	< 0,5
Linearity error	< 0,02%	< 0,02%	< 0,01%	> 1%	> 0,1%	> 0,5%	< 0,02-1%

Tabloda verilen sembollerin açıklamaları aşağıdaki şekildedir.

f ; titreşimli telli kuvvet dönüştürücüsü için rezonans frekansı,

Ω ; jiroskopik kuvvet dönüştürücüsü için açısal hız,

i ; elektromanyetik kuvvet kompanzasyonu için geri besleme çevrimi akımı,

μ ; manyetoelastik kuvvet dönüştürücüsü için manyetik geçirgenlik

f ; yüzey akustik dalgaları kuvvet dönüştürücüsü için akustik frekans,

S ; doğrusal potansiyometre, LVDT ve düzlem plakalı kondansatör için, yer değiştirme duyarlılığı,

ϵ ; kuvvet dönüştürücüsünün elastik elemanının içindeki uzama

Blom tarafından 1989 yılında yapılan kuvvet dönüştürücülerin sınıflandırılması ise Tablo 3.3'te verilmiştir. Kuvvet dönüştürücüler 3 gruba ayırmıştır. Bunlar, direkt dönüştürücüler, birleşik dönüştürücüler ve kuvvet dengeleyiciler olarak gruplandırmıştır.

Tablo 3.3. Blom tarafında yapılan kuvvet transdüserleri için ölçüm prensiplerinin sınıflandırılması

KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	Ölçüm aralığı [N]	Çözünürlük [ppm]	Stabilite [ppm]
<u>Direkt Dönüşüm</u>			
Titreşimli tel	5 ... 100	100	10
Piezoelektrik	$10^3 \dots 10^7$	10000	200
Rezonans kuartz ışını	1 ... 10	20	10
<u>Birleşik Dönüşüm</u>			
Dirençli uzama ölçer	$1 \dots 10^7$	100	15
Yer değişimi: LVDT	$10^{-2} \dots 10^4$	1000	500
Kapasitif	10 ... 100	2000	200
Hidrolik	$500 \dots 2 \times 10^5$	10000	1000
Jiroskopik	50 ... 250	10	1
Magnetoelastik	$2 \times 10^3 \dots 10^7$	500	30
<u>Kuvvet Dengeleme</u>			
Terazi	max. 10^4	1	20
Electromagnetik dengeleme	$10^{-3} \dots 10^2$	1	10

Mansfield, 1973'te kuvvet, ağırlık ve tork ölçümü için dönüştürücü özelliklerinin özet tablosunda ise, sadece aşağıdaki türleri vermiştir. Dirençli, manyetoelastik ve piezoelektrik (şarj amplifikatörü, kuvars osilatör ve özel piezo-transistör). Mekanik boyutların bilgisayarlı ölçüm özelliklerine odaklanan Morrison ise, piezoelektrik, piezodirençli ve kapasitif dönüştürücülerle sınırlamıştır.

Teknolojik ilerleme ve endüstri gereklilikleri sonucunda, İngiltere Ulusal Fizik Laboratuvarı (NPL) 1998'de "Kuvvetin Ölçülmesi Kılavuzu" düzenlemiştir. Bu dokümanda verilen çeşitli kuvvet dönüştürücülerin tipleri ve özelliklerinin bir özeti Tablo 3.4'te sunulmuştur. Tablodaki rakamlar tipik değerleri temsil eder, dönüştürücü ve sistemleri genellikle aşağıdaki gibi ama artan belirsizlik ile çalışacaktır.

Tablo 3.4. Kuvvet dönüştürücü tipleri ve özellikleri için özet tablo

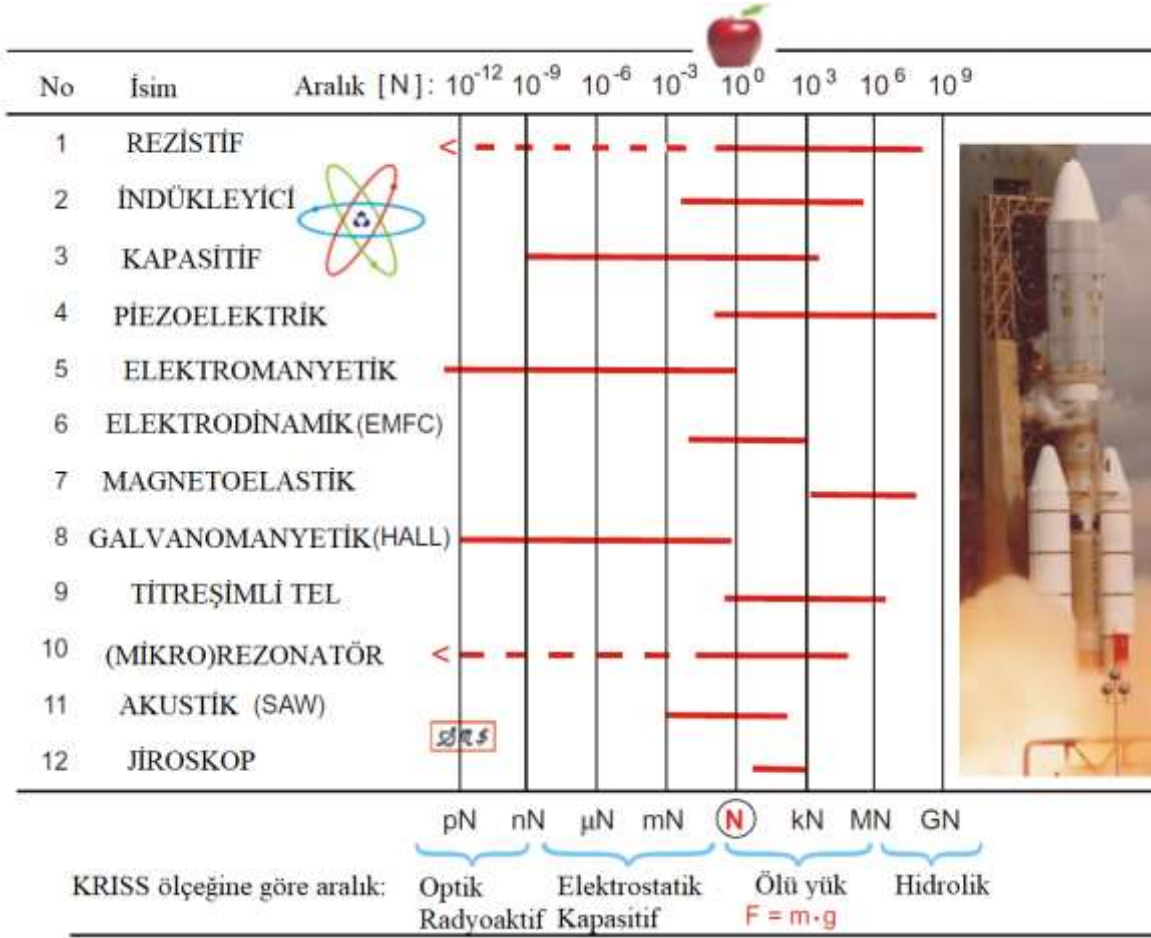
Cihaz tipi	Tipik kapasitelerinin ölçüm aralığı	Tipik belirsizlik, okuma % 'si	Tipik sıcaklık hassasiyeti ve çalışma aralığı, °C başına okuma % 'si
Uzama ölçerli yük hücreleri:			
Yarı iletken ölçerler	0,01 N - 10 kN	0.2 ile 1	0,02 (-40 °C ile +80 °C)
İnce film ölçerler	0.1 N - 1 MN	0,02 ile 1	0,02 (-40 °C ile +80 °C)
Folyo ölçerler	5 N - 50 MN	0,02 ile 1	0,01 (-40 °C ile +80 °C)
Piezoelektrik kristal	1,5 mN – 120 MN	0.3 ile 1	0.02 (-190 °C ile +200 °C)
Hidrolik	500 N - 5 MN	0.25 ile 5	0.05 (+5 °C ile +40 °C)
Pnömatik	10 N - 500 kN	0.1 ile 2	0.05 (+5 °C ile +40 °C)
LVDT, kapasitif, ayar çatalı, titreşimli tel	10 mN - 1 MN	0.02 ile 2	0.02 (-40 °C ile +80 °C)
Manyetostriktif	2 kN - 50 MN	0,5 ile 2	0.04 (-40 °C ile +80 °C)
Jiroskopik **	1 50 N - 250 N	0.001	0.0001 (-10 °C ile +40 °C)
Kuvvet terazisi **	0.25 N - 20 N	0.0001	0.0001 (-10 °C ile +40 °C)

** Çok çeşitli yer değiştirme dönüştürücüsü, jiroskopik yük hücresi ve kuvvet terazisi ile birlikte kullanılabilir. Tam performans limitleri, kullanılan özel tipe bağlı olacaktır.

Tablo 3.5 KRISS tarafından düzenlenmiş olup, öncelikle rakamlara dayanan bir grafiksel gösterimle ilk ölçüm aralığı vurgulanmıştır. Bu 12 kuvvet dönüştürücü grubunun 1 N değerinde "ortalananmış" olduğu görülebilir. Küçük kuvvetler, nanoteknolojiler, atomik kuvvet mikroskobu ve manyetik akı kuantum temelli teknikler alanında kullanımları vardır.

Çok büyük kuvvetler ise, gemi inşaatı, inşaat mühendisliği, metalürji endüstrisi (haddehaneler) ve daha göze çarpan, uzay mekiği katı roket güçlendirici için itme ölçümünün gerekliliği olarak kullanılmaktadır.

Tabloda gösterildiği gibi kuvvet için maksimum değerler, piezoelektrik kuvvet dönüştürücüleri (120 MN), ardından dirençli uzama ölçerleri ve manyetoelastik ölçerler için görünür.

Tablo 3.5 Kuvvet dönüştürücüleri için ölçüm prensiplerinin grafiksel gösterimi

Diğer bir sınıflandırma da ölçüm yöntemlerine göre yapılabilir. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan yöntemler şöyledir:

A. Bilinen Yük İle Dengeleme

Ölçülecek kuvvet belirli kütlelere sahip bir karşı ağırlık tarafından dengelenir ve

$$\text{Kuvvet} = \text{Karşı Ağırlığın Kütlesi} \times \text{Yerçekimi İvmesi}$$

olarak hesaplanır. Pratik zorluğuna karşın, bu metod yüksek doğruluk verir. Kuvvet (yük) ölçümü kütlelerin uygulanması ile sağlanır ve ölü ağırlıklı sistemler olarak adlandırılırlar.

B. 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. Çeşitli durumlar için uygun ölçme metotlarının seçilmesiyle, istenen deformasyon miktarları ölçülebilir.

C. Uygulanan Kuvvet Etkisiyle Fiziksel Özelliklerin Değişiminden Yararlanma

Bu metod uygulanan kuvvete karşılık malzemelerin manyetik veya elektriksel özelliklerinin (electrostriction ve magnetostriction) değişiminden yararlanır. Fiziksel özelliklerdeki lineer olmayan değişimlerden dolayı, yaygın bir uygulama alanı yoktur. Fakat bilimsel yönden ilgi çekicidir ve bu özelliklerin uygulandığı bazı ölçme alanları mevcuttur.

Bu yöntemler ile çalışan birçok cihaz üretilmiştir. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan cihazlar ise şöyle sıralanabilir:

A. Elektriksel Kuvvet Ölçme Cihazları

- 1) Direnç Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları
- 2) Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları
- 3) Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları
- 4) Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları
- 5) İnduktif Kuvvet Ölçme Cihazları
- 6) Elektromanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları
- 7) Elektrodinamik Kuvvet Ölçme Cihazları
- 8) Galvanomanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları
- 9) Akustik Kuvvet Ölçme Cihazları

B. Mekanik Kuvvet Ölçme Cihazları

- 1) Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazları
- 2) Ölçme Halkaları
- 3) Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazları
- 4) Titreşim Telli Kuvvet Ölçme Cihazları
- 5) Rezonatör Kuvvet Ölçme Cihazları
- 6) Jirokopik Kuvvet Ölçme Cihazları

Birçok çeşidi bulunan kuvvet ölçme cihazları, kullanım alanlarına ve ölçüm kabiliyetlerinin uygunluklarına göre seçilip kullanılmaktadır.

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan kuvvet kalibrasyon makinaları da aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Ölü ağırlıklı,
- Hidrolik büyütmeli,

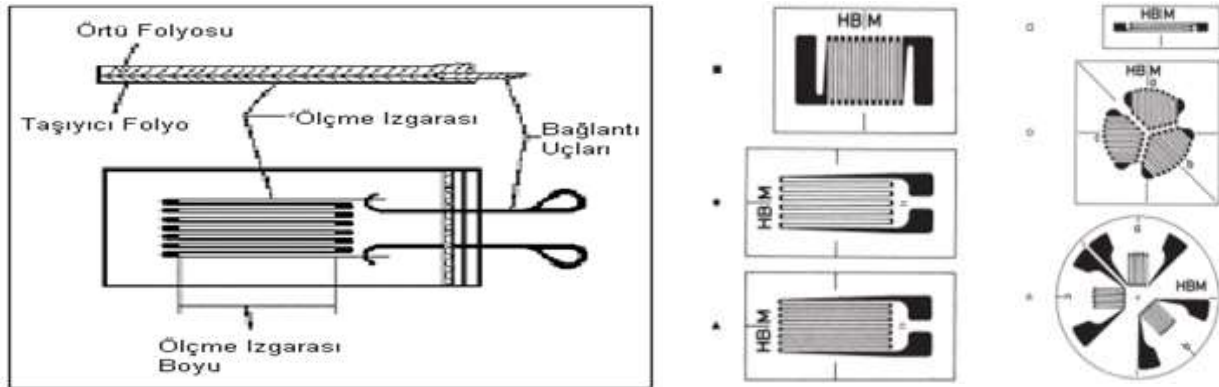
- Manivela büyütmeli,
- Birden fazla kuvvet referans dönüştürücü sistemli makinalardır.

Yukarıda verilen kuvvet ölçme cihazları ve kuvvet kalibrasyon makinalarının detayları aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

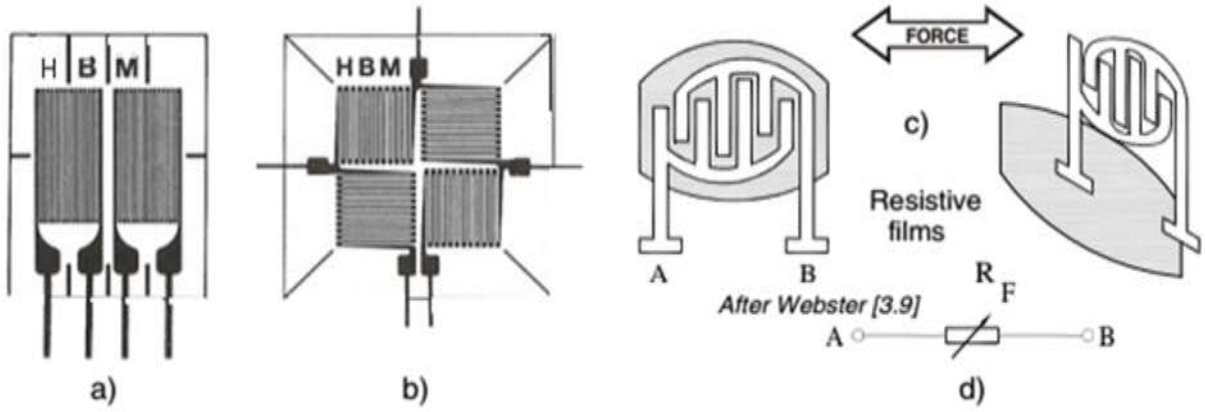
3.1. Dirençli Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları

Elektrik dirençli uzama ölçerlerin çalışma prensibi, 1856 yılında Lord Kelvin tarafından ifade edilen elektriksel olarak iletken olan malzemelere gerilme uygulandığında oluşan birim şekil değişimi ile orantılı olarak elektrik direnç değerleri değişmesi prensibine dayanmaktadır. Uzama yönünde birim şekil değişimleri elektrik direnç değerinde artışa, kısalma yönünde birim şekil değişimleri ise elektrik direnç değerinde azalmaya yol açmaktadır.

Mekaniksel gerilmelerin elektriksel büyüklüğe dönüştürülmesinde kullanılan elektrik dirençli uzama ölçerler amaca göre çok değişik şekil ve özellikte üretilmektedir. Dirençli uzama ölçerin yapısı Şekil 3.5 ve 6'da görüldüğü gibi; uzama teli, taşıyıcı ve örtü folyoları ve lehim uçları olmak üzere üç kısımdır. Birinci kısımda, ölçmede yararlanılan malzeme ile birlikte şekil değiştirerek ΔR direnç farkını oluşturan uzama teli, iki izole folyo arasında yer almaktadır. Uzama telinin çapı genellikle $18 - 25 \times 10^{-3}$ mm arasındadır. Bir kısım uzama telleri ise $3 - 5 \times 10^{-3}$ mm kalınlığında direnç malzemesinden kesilmiş madeni folyodan yapılmaktadır.



Şekil 3.5. Bir dirençli uzama (gerinim) ölçer elemanının yapısı ve farklı tipleri



Şekil 3.6. Klasik dirençli uzama ölçerler: çiftli (a) ve dörtlü (b); uygulanan kuvvete bağlı olarak modern kuvvet algılama dirençleri (c) ve direnç değerinin bir sembolü (d)

En yaygın tel malzemeleri konstantan (Cu-Ni) veya isoelastik (Fe - Ni) alaşımlarıdır. Bu malzemelerin sıcaklıkla boyut değişimleri çok sınırlı olduğundan dirençleri de çok az değişmekte olup özgül dirençleri yüksek ve uzayabilme yetenekleri fazladır. İkinci kısım, değişik şekillere sahip olabilen, uzama telini içine alan, elektriksel yönden izole, örtü ve taşıyıcı folyodan oluşmaktadır. Üçüncü kısım, uzama telinin dış devrelere bağlanmasını sağlayan, daha kalın lehim uçlarından oluşmuştur; bunlar folyo içindeki uzama teline lehim edilmişlerdir.

Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki

Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişkiyi, üzerinden akım geçen bir telin uygulanan gerilme sonucunda uzatılması durumu ele alınarak incelendiğinde, aşağıdaki analize ulaşılır.

Bu analizde kullanılan fiziksel büyüklükler aşağıda sıralanmıştır.

R : Telin direnci

λ : Tel malzemesinin özgül direnci

L : Telin uzunluğu

μ : Poisson oranı

V : Telin hacmi

r : Telin yarıçapı

A : Telin kesit alanı

$$R = \lambda \cdot \frac{L}{A} \quad (1)$$

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2)$$

olarak elde edilir.

(1) ve (2) denklemlerinin logaritması alındığında,

$$\log R = \log \lambda + \log L - \log A \quad (3)$$

$$\log A = \log \pi + 2 \cdot \log r \quad (4)$$

elde edilir. (3) eşitliği (4) 'da yerine koyulup kısmi türevi alındığında da;

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - 2 \cdot \frac{dr}{r} \quad (5)$$

elde edilir. Silindirik bir telde eksenel ε_l birim şekil değişimi;

$$\varepsilon_l = \frac{dl}{l} \quad (6)$$

olduğundan yatay ekseninde ε_r birim şekil değişimine neden olur.

$$\varepsilon_r = \frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} \quad (7)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} \cdot (1 + 2 \cdot \mu) \quad (8)$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = \frac{\frac{d\lambda}{\lambda}}{\frac{dL}{L}} + (1 + 2 \cdot \mu) \quad (9)$$

Bridgman'a göre, hidrostatik basınç altındaki metaller için aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = c \cdot \left(\frac{dV}{V} \right) \quad (10)$$

Burada c bir malzeme sabitidir.

Bu koşulun uygulanan gerilme altındaki metaller için de kullanılabileceği kabul edilirse;

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = c \cdot \frac{dV}{V} = c \cdot \left(\frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} \right) = c \cdot \frac{dL}{L} \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (11)$$

sonucu elde edilir. Buradan birim uzama değişiminin yol açtığı direnç değişimi oranlanırsa,

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = (1 + 2 \cdot \mu) + c \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (12)$$

bağıntısı elde edilir.

(12) no'lu eşitliğin sağ tarafı, bir dirençli uzama ölçerin, ölçme cihazı olarak hassasiyetinin boyutunu vermektedir ve yaygın olarak k harfi ile gösterilmekte olup; "k-faktörü" olarak anılmaktadır.

Böylece temel eşitlik, (13) bağıntısındaki şeklini almaktadır.

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \frac{dL}{L} \quad (13)$$

$$k = (1 + 2 \cdot \mu) + c \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (14)$$

Wheatstone köprüsünün temel prensibi ve kuvvetin okunması

Wheatstone köprüsü direnç değişimi ölçümünün bilinen en iyi yöntemidir. Köprü elemanı olarak kullanılan dirençli uzama ölçerlerin ölçüm yapılacak yerlere uygun şekilde yapıştırılmalarıyla, fiziksel boyutlarda meydana gelen mikron seviyesindeki değişimleri elektriksel direnç değişimine dönüştürmek ve bu değişimi bir göstergeden okumak yapılan işlemi tarif etmektedir. Direnç değişimi ile boyutsal değişim arasındaki ifade (13) bağıntısında gösterilmekte olup bu ifadeyi yeniden (15)'deki gibi yazma olanağı vardır.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = k \cdot \varepsilon \quad (15)$$

R : Dirençli uzama ölçerin gerilme uygulanmadan önceki direnci

ΔR : Gerilmenin yarattığı direnç farkı

L_0 : Malzemenin ilk boyu

ΔL : Gerilmenin yarattığı uzama

k : Dirençli uzama ölçere ait orantı faktörü

ε : Birim şekil değişimi

$\Delta L/L_0$ oranı ε ile ifade edilir ve dirençli uzama ölçerin birim şekil değişimi olarak adlandırılır. Malzemeye uygulanan gerilme, dirençli uzama ölçer tarafından direnç değişimine dönüştürülürken, önceden her dirençli uzama ölçer için deneysel olarak bulunmuş olan k orantı faktörü dikkate alınır. Dirençli uzama ölçerin saptanan direnç değişiminin k 'ya bölünmesi ile malzemedeki birim uzama bulunur. Ölçüm yapılan malzemenin E elastiklik modülünün bilinmesi halinde malzemedeki tek eksenli gerilme hali için geçerli olan Hooke bağıntısı yardımıyla, gerilme;

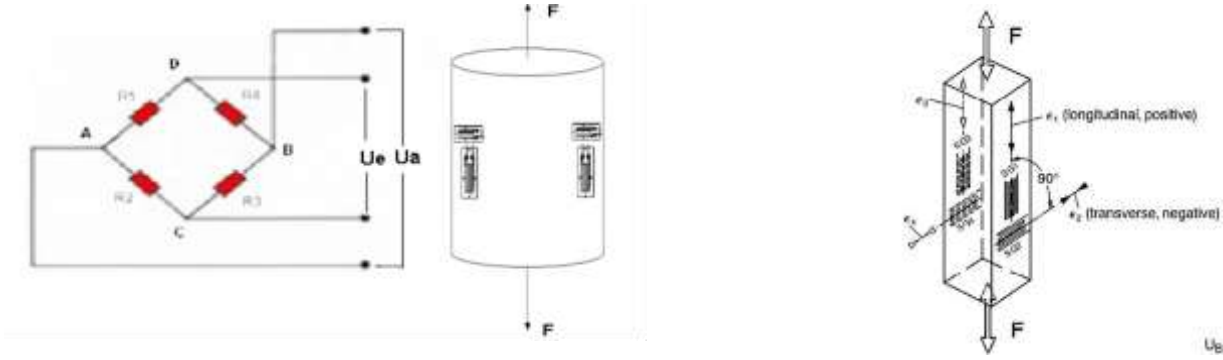
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

eşitliği ile hesaplanabileceği gibi aynı eşitlik yardımıyla

$$\sigma = E \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (17)$$

şeklinde de hesaplanabilir.

Şekil 3.6'da şematik olarak verilen ve dört kolu bulunan bir Wheatstone köprüsü R_1 , R_2 , R_3 , R_4 dirençli uzama ölçer elemanlarından oluşmaktadır. Bu tip dönüştürücü imalatı yapan her firma, giriş ve çıkış uçlarını farklı renklerle kodlayarak kullanma kolaylığını hedeflemişlerdir. Böylece, hazır alınan bir köprü devresinin giriş ve çıkış uçları kolayca saptanabilmektedir. Şekil 3.7'de dirençli uzama ölçer elemanları ile oluşturulan bir köprü ve kolon tipi bir kuvvet dönüştürücü üzerindeki yerleri gösterilmektedir.



U_A : Çıkış gerilimi U_E : Giriş gerilimi

Şekil 3.7. Çekme çubuğu üzerine yapıştırılmış dirençli uzama ölçerlerden oluşmuş Wheatstone köprü devresi

Uygulamalarda girişe uygulanan gerilim giriş gerilimi veya besleme gerilimi olarak bilinmekte olup genellikle 5 ile 15 V arasında belirlenir. Dönüştürücü sınıfı dirençli uzama ölçerler için bu değer genelde 5 V olarak seçilmektedir. Daha yüksek bir besleme gerilimi ızgaranın aşırı ısınmasına neden olur. Düşük besleme geriliminde de ısı oluşmaktadır ancak bu dirençli uzama ölçerlerin yapıştırıldığı malzeme yüzeyine kolayca iletilerek denge sağlanmaktadır. Dolayısıyla, bu ısının çok düşük değerlerde kalması gereklidir. Aksi durumda, kuvvet dönüştürücüde sıcaklık kompanzasyonunda bazı kayıplar meydana gelir ve histerisiz ile sürünme değerleri artar.

Çıkış geriliminin değeri, giriş gerilimine ve R_1/R_2 , R_3/R_4 dirençlerinin oranlarına bağlıdır. Genel olarak,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (18)$$

bağıntısı geçerli olup özel bir durum olarak $R_1=R_2=R_3=R_4$ veya $R_1/R_2 = R_3/R_4$ koşulu varsa $U_A/U_E=0$ olmaktadır. Bu denklemde U_A : çıkış gerilimi, U_E : ise besleme gerilimidir. Uygulamada sağladığı yarar açısından U_A/U_E oranı başlangıçta sürekli olarak sıfır yapılmaya çalışılmaktadır.

R_1, R_2, R_3, R_4 dirençlerinden bir veya birkaçının değerinin değişmesi, U_A çıkış geriliminin de değişmesi ile sonuçlanır. Ara işlemler ve bazı değerlerin çok küçük olması nedeniyle ihmalleri yapıldığında (18) denklemi (19) şeklinde yazmak olasıdır.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (19)$$

elde edilir. Bu son eşitlikte (15) bağıntısında gösterilen $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ yerine koyulursa,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (20)$$

ifadesine ulaşılır.

Kuvvet dönüştürücü tasarım ve üretiminde genellikle bu eşitlik kullanılarak tam yük uygulandığında elde edilen çıkış gerilimi olan ve hassasiyet (sensitivity) olarak adlandırılan 2 mV/V'luk (5 V'luk besleme gerilimi için 10 mV'luk bir çıkış gerilimi) değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Ölçümlerde dirençli uzama ölçer eksenlerinin yük eksenine ile çakışması gerekir. Aksi durumda dirençli uzama ölçer, yükün yalnızca kendi eksenine üzerindeki izdüşümünü ölçebilmektedir. Dirençli uzama ölçerlerin ölçme eksenine tam paralel ve tam dik olacak şekilde yapıştırılamamaları durumunda ölçme yapacak dirençli uzama ölçer eksenleri ile ölçme eksenine arasında kalan açıdan dolayı uygulanan kuvvete ek bileşke kuvvetler ortaya çıkacak ve bu da hataya neden olacaktır. Buradan gelebilecek hatayı en aza indirmek için kolon türü kuvvet dönüştürücülerde dirençli uzama ölçerlerin 90° açıya sahip olanlarının kullanılması gerekmektedir. Bunu sağlayacak birbirine göre 90° açıya sahip dirençli uzama ölçerler seçilmiş olup bunların kolon türü bir yay elemanı üzerinde yerleşim düzenleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

Köprü kollarında bulunan dirençlerden bir veya birkaçının direncinin değişmesi sonucu (20) numaralı eşitlik uyarınca, köprü çıkışında girişe göre bir farklılık oluşmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen U_A/U_E değeri, uzamanın bir fonksiyonudur. Bu nedenle, her zaman kullanılan ölçme cihazlarının ölçüm aralıkları uzamayı esas alan bir yöntemle kalibre edilmektedir. Genel olarak cihazlarda uzama birimi olarak $1 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{m}$ kullanılmaktadır. Bazı özel ölçü aletlerinde göstergede okunan ε değeri, o andaki gerçek değer $\Delta L/L$ 'yi göstermektedir. Bu tip cihazlar dirençli uzama ölçerinin k faktörü dikkate alınarak kalibre edilmişlerdir. Çok yüksek doğruluklu ölçümler yapılması amacı ile geliştirilmiş cihazlarda ise doğrudan mV/V cinsinden gösterge değeri elde edilebilmektedir.

Çekme gerilmesi uygulanan ve Şekil 3.6'da gösterilen çubukta gerilme yönündeki birim uzama $\varepsilon_1 = \sigma / E$, gerilme yönüne dik yöndeki birim uzama ise $\varepsilon_2 = -\mu \varepsilon_1$ şeklinde tanımlanmaktadır. O halde 1 no'lu dirençli uzama ölçer'in direnç değişimi $\Delta R_1 = \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_1$ ve 2 no'lu dirençli uzama ölçerinin direnç

değişimi $\Delta R_2 = \mu \cdot \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_2$ kadar olacaktır. Aynı eşitlikler 3 ve 4 no'lu dirençli uzama ölçerler için de yazılabilir. Burada μ , Poisson oranıdır.

Şekil 3.7'de gösterilen dört dirençli uzama ölçer aynı şekildeki çekme çubuğu üzerindeki gibi indislenir ve bir tam köprü yapacak şekilde bağlanırsa, ölçme sonunda, 20 no'lu bağıntıya uygun olarak;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (20)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_1 - (-\mu\varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\mu\varepsilon_3)] \quad (21)$$

eşitliği yazılabilir.

Yaklaşık $\mu = 0.30$ olması ve $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$, ve $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 \cong 0.3 \cdot \varepsilon_1$ kabul edilmesi durumunda,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot 2.6 \cdot \varepsilon_1 \quad (22)$$

elde edilir. Dört aktif dirençli uzama ölçer tarafından oluşturulan köprü devresinden alınacak sinyal ε_1 uzamasının 2,6 katıdır. Çubukta basma gerilmesi olursa ε_1 den ε_4 'e kadar olan birim uzamaların yalnızca işareti değişecektir. Çekme çubuğu şeklinde üretilen gerçek bir deney numunesi üzerinde dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılmış ve Wheatstone devresi oluşturulmuş konumundaki resmi ile ölçümde kullanılan gösterge ünitesi resmi birlikte Şekil 3.8'de görülmektedir.

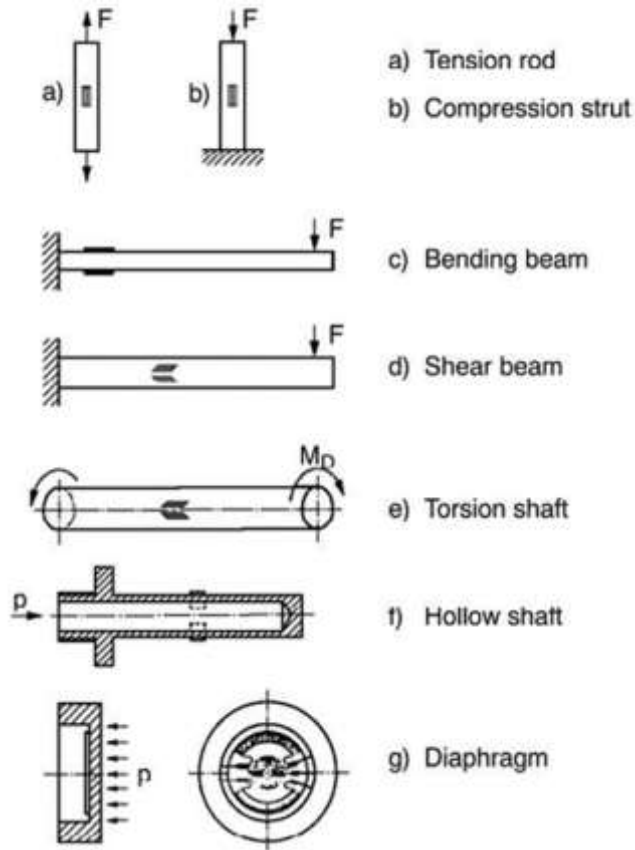


Şekil 3.8. Çekme çubuğu şeklindeki numune üzerinde dirençli uzama ölçer devresi ve gösterge ünitesi

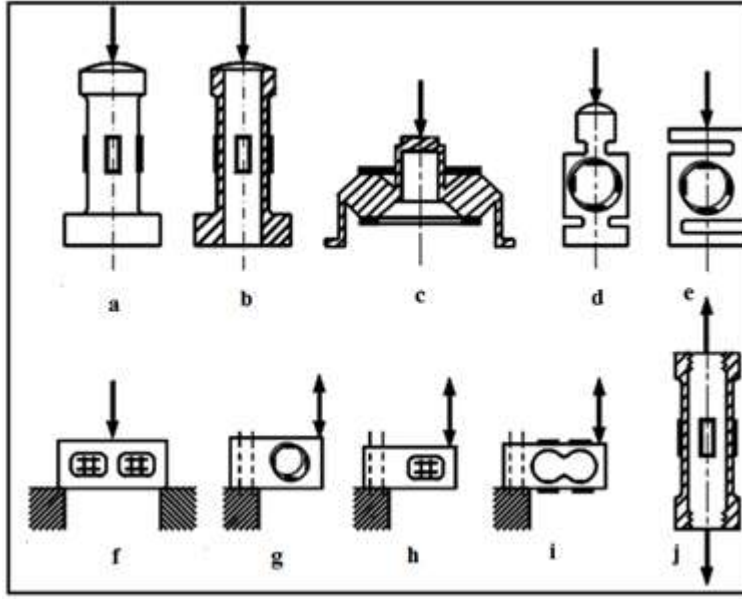
Kuvvet Dönüştürücü Tasarımının Mekanik ve Malzeme Açısından Kriterleri

Bir kuvvet dönüştürücüsünün ana gövdesini oluşturan mekanik parçası yay elemanıdır. Genel olarak ifade edildiğinde, yay elemanının fonksiyonu, uygulanan yüke reaksiyon göstermek ve bunu yaparken yük ölçümü amacı ile yerleştirilmiş olan dirençli uzama ölçerler yardımıyla düzgün ve homojen bir şekil değişimi bölgesi oluşturmaktır. Bu tanımlamadan da anlaşıldığı gibi, yay elemanının ölçüm alanındaki birim şekil değişimi seviyesinin, uygulanan yükle doğrusal ve elastik bir ilişki içinde olması gerektiridir. Bir başka deyişle, ideal bir kuvvet dönüştürücüsü, uygulanan gerilmeyle oluşan birim şekil değişimi arasında doğrusal bir orana sahiptir.

Kuvvet dönüştürücüsü yay elemanları, öngörülen şekil değişimi türüne bağlı olarak 7 ayrı gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.9 ve 3.10): Çekme, basma, eğme gerilmeli, kesme gerilmeli, burulmalı, borulu ve diyafram olarak sayılabilir.



Şekil 3.9. Çekme çubuğu şeklindeki numune üzerinde dirençli uzama ölçer devresi ve gösterge ünitesi



- a) Basma silindiri 50 kN - 50 MN
- b) Basma silindiri (içi boş) 10 kN - 50 MN
- c) Toroidal halka 1 kN ile 5 MN
- d) 1 kN ile 1 MN arası halka
- e) S tipi (bükme veya kesme) 50 N ile 50 kN
- f) Çift uçlu kesme kirişi 20 kN ile 2 MN
- g) Çift eğme kirişi (basitleştirilmiş) 500 N ile 50 kN
- h) Kesme kirişi 1 kN - 500 kN
- i) Çift eğme kirişi 5 N ile 10 kN
- j) 50 kN ile 50 MN çekme silindiri

Şekil 3.10. Tipik elastik elemanlar ve nominal ölçüm kapasiteleri

Yay elemanı tasarımında temel kriterler

Aşağıda açıklananlar genel olarak tüm kuvvet dönüştürücüsü yay elemanları için geçerlidir. Ancak, her bir kriterin önemi söz konusu olan dönüştürücünün kullanım amacı ve türüne bağlı olarak değişmektedir. Tüm bu kriterler birbirlerinden bağımsız olmayıp aralarında yakın ilişkiler vardır.

a. Doğal frekans

Kuvvet dönüştürücü için belirlenmiş hassasiyet ve diğer işlevsel gereksinimlerin sonucu, yay elemanının doğal frekansı olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu, normal olarak gereksiz, kütlesi olmayan, rijit ve düşük esnemeli bir tasarımı gerektirmektedir. Doğal frekansın yüksek tutulmasının en önemli sonucu yay elemanı elastik şekil değişimi miktarının en aza indirilmesi gerekliliğidir. Bunun nedeni ise, dirençli uzama ölçer ölçme aralığının, elastik alanda iyi bir performans sergilemesi için en çok 1700 $\mu\text{m}/\text{m}$ ile sınırlı olması gereğidir. Deneylerde kullanılan numunelerin doğal frekansı aşağıdaki eşitliklerden yararlanarak elde edilebilmektedir.

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{eş}}{m}} \quad (23)$$

$$k_{1,2,..,n} = \frac{E \cdot A}{L} \quad (24)$$

$$\frac{1}{k_{eş}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (25)$$

ω : Numunenin doğal frekansı

m : Numunenin kütlesi

$K_{1,2,...,n}$: Numunenin yay sabiti, (farklı kesitler için (24) ile hesaplanan yay sabitleri)

$K_{eş}$: Numune için eşdeğer yay sabiti

E : Numune malzemesinin elastiklik modülü

A : Numunenin kesit alanı

L : Numune boyu

b. Tam yük uygulandığında, ölçme bölgesinde dirençli uzama ölçer için uygun performansı veren birim şekil değişiminin sağlanması ve en uygun noktanın belirlenmesi

Yay elemanı tasarımında ilk önce yay elemanı boyutlarının kuvvet dönüştürücü tam yük altında iken, ölçme bölgesinde önceden belirlenmiş olan birim şekil değişimi oluşacak şekilde seçilmesi gereklidir. Yay elemanının ölçme bölgesindeki birim şekil değişimi miktarı, tam yükleme anında istenen çıkış sinyalini sağlayacak uygun bir büyüklükte ve homojen bir şekilde yayılmış olmalıdır. Yay malzemesinin doğrusal birim şekil değişimi göstermemesi, dirençli uzama ölçerlerin yorulma ömrü gibi çeşitli sınırlayıcı etkenlerden dolayı, birim şekil değişimi seviyesi genellikle 1000 - 1700 $\mu\text{m}/\text{m}$ arasında tutulmaktadır. Uzama ölçer tüm yay elemanı boyunca en büyük birim şekil değişiminin olduğu noktaya yapıştırılmalıdır. Bu sayede uygulanan kuvvete karşılık elde edilen sinyal en yüksek değerde olacaktır.

c. Ölçme bölgesinde homojen birim şekil değişimi dağılımının sağlanması

Kuvvet dönüştürücüsünün elektrik çıkışı, ölçme bölgesindeki izin verilen maksimum birim şekil değişimi seviyesi ile sınırlanmıştır. Bu birim şekil değişimi seviyesi ile ölçüm sinyalinin en büyük değerine ulaşılabilmesi için dirençli uzama ölçer ızgaralarının bulunduğu tüm alan üzerinde homojen bir şekilde yayılmış olmalıdır. Eğer uygulanabiliyorsa dirençli uzama ölçerin lehim plakalarının en düşük birim şekil değişiminin olduğu alanda olması dirençli uzama ölçerin yorulma ömrünü de olumlu yönde etkileyerek iyileştirir.

d. Dirençli uzama ölçerin yapıştırıldığı alan dışında kalan kısımlarında düşük birim şekil değişiminin elde edilmesi

Yay elemanının en büyük birim şekil değişiminin olduğu noktadaki birim şekil değişimi miktarı, tam yükleme anında istenen çıkış sinyalini sağlayacak uygun bir büyüklükte ve homojen bir şekilde yayılmış olmalıdır. Genellikle, yorulma ömrü, doğrusallık, sürünme ve histerisiz gibi kuvvet dönüştürücüsünün performansını belirleyen özellikler, yay elemanının tümünde etkin olan gerilme seviyesinin düşürülmesi ile iyileştirilebilir. Yapılan araştırmalar en iyi yay elemanı malzemelerinde

bile tüm katıların gerilme altında belirli derecelerde mikropplastik davranışlar sergilediklerini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, düşük seviyeli mekanik zorlamalar, ideal doğrusal elastik davranıştan daha düşük sapmalar demektir. Bu nedenle kuvvet dönüştürücü tasarımı yapılırken elastik bölgenin oldukça altında bir bölge seçilerek mikropplastik davranış olabildiğince düşük tutulmaya çalışılmaktadır.

e. Tek parça üretim

Kuvvet dönüştürücüsünün tek parça olarak üretilmesinde tekrarlanabilirlik, doğrusallık ve histerisiz hataları gibi tüm değerlendirme parametreleri en iyi değerlerine ulaşmaktadır. Kuvvet altında yay elemanının şekil değiştirmesi çok küçük ve gözle görülemez olmasına karşın, gerçek ve sonlu bir büyüklüktür. Bu yüzden, her türlü çok parçalı üretimdeki mekanik bağlantı, hareket ve sürtünme doğrusallıktan sapma ve histerisize neden olmaktadır. Kaynak bağlantıları da yorulma ömrüne ve mikropplastik davranışa olumsuz katkıda bulundukları ve artık gerilmeler ile metalürjik düzensizlikler içermeleri nedeniyle tercih edilmemektedirler.

f. Ölçüm eksenindeki yüklerle karşı düşük duyarlılık göstermesi

İdeal bir kuvvet dönüştürücüsü (özel amaçlı dönüştürücüler hariç) yalnızca tek bir eksenindeki kuvvet bileşenlerine cevap vermeli, diğer yönlerden gelen kuvvet ve momentlere karşı çıkış vermeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Her ne kadar ideal kuvvet dönüştürücü tanımına ulaşma olanağı yoksa da dikkatli tasarım ile ideale yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu durum için, yalnızca yay elemanı ile değil aynı zamanda dirençli uzama ölçerin uygulandığı noktanın, konumunun ve muhafaza parçalarının da doğru seçilmesi önemlidir.

g. Aşırı yük uygulanmasına karşı koruma

Dönüştürücü imalatçıların çok sıklıkla karşılaştıkları durumlardan birisi olarak, dönüştürücülerin kullanıldıkları yerde zaman zaman aşırı yüke maruz kalmaları gösterilmektedir. Bazı dönüştürücüler, aşırı bir yükleme anında mekanik durdurucunun devreye gireceği şekilde tasarlanmaktadır. Bazı modeller de ise, yay elemanını içinde taşıyan gövde aşırı yüklemeyi kendi üzerine alacak şekilde yapılmaktadır. Ancak genel bir kural olarak ticari tür kuvvet dönüştürücüler, nominal kuvvet kapasitelerinin % 150 ila 200'ü kadar bir aşırı kuvvete karşı hasarsız dayanabilme, % 300 ila 500'ü kadar bir aşırı yüklemeye ise kalıcı şekil değişiminin gözlemlendiği yani hasar başlangıcı olacak şekilde boyutlandırılmaktadır.

h. Yay elemanı üzerinde dirençli uzama ölçerlerin rahat yapıştırılabilecek şekilde ve gövdenin kolay imal edilebilecek şekilde tasarlanması

Pazar koşullarında rekabet edilebilmesi için kuvvet dönüştürücülerin uygun bir fiyata üretilip pazara sunulması gerekir. Bunun bir yolu da en büyük maliyete sahip olan işçilik giderlerini olabildiğince düşürmektir. Eğer tasarımı gerçekleşen kuvvet dönüştürücü karmaşık bir yapıya sahip ise, hem

imalat hem de dirençli uzama ölçer yapıştırma işçiliği çok artacak ve bu da işçilik zamanını arttıracaktır. Bir dönüştürücünün gerektirdiği kalitede dirençli uzama ölçerin yapıştırılması, bir dirençli uzama ölçerin fiyatından çok daha pahalıdır. Bu nedenle yay elemanı tasarlanırken sürekli olarak dirençli uzama ölçerin en rahat şekilde yapıştırılabileceği şekilde tasarlanmalıdır. Hızlı ve kolay dirençli uzama ölçer uygulamalarının olanaklı olduğu düzgün ve dış yüzeyli yay elemanlar en cazip olanlardır. Diğer koşullar izin verdiği sürece yüzey hazırlıkları, yapıştırıcı uygulanması, dirençli uzama ölçer uygulaması, sıkıştırma, fırınlama, kablo bağlantılarının yapılması gibi işlemlerin gerçekleştirilebilmesine olanak verecek şekilde olmalıdır. Bu nedenlerden dolayı, kolon türü dönüştürücüler bu özelliğe sahip en ideal elemanlardan birisidir.

i. Sıcaklığın etkisi

İlk bakışta optimum bir yay elemanına ulaşmanın yolu yalnızca başarılı bir mekanik tasarıma bağlıymış gibi gözükebilir. Ancak, gerçekte durum böyle olmayıp sıcaklıktan kaynaklanan etkiler de titizlikle değerlendirilmeli ve mekanik koşullarla birlikte ele alınmalıdır. İlk olarak, dirençli uzama ölçer bir ısı kaynağıdır ve bu ısı tüm yay elemanını etkiler.

Sıcaklığın, yay elemanı ve dirençli uzama ölçer performansının her ikisi üzerindeki etkilerinin en aza indirebilmesi için yay elemanı, dirençli uzama ölçerlerin yerleşimi itibari ile simetrik olmalıdır.

Buna ek olarak, birçok kuvvet ölçme cihazı, kullanıldıkları yerlerde çok farklı sıcaklık farklarının etkisinde kalırlar. Kuvvet dönüştürücünün korunması ile yay elemanı arasındaki ısı akış yollarının dikkatle incelenmesi ön koşuldur. Özellikle, aynı köprü üzerinde yer alan ve birbirinin ardı sıra gelen iki dirençli uzama ölçer arasındaki sıcaklık farkının en az olacağı oluşumlar üzerinde çalışılmalıdır.

Tek eksenli yükleme ile zorlanan kolon tipi yay elemanının yapısı

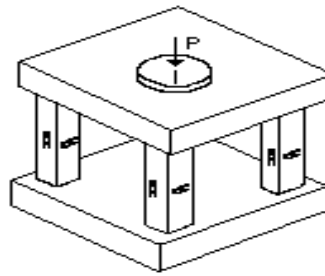
Tek eksenli yükleme ile zorlanan pek çok dönüştürücü tipi vardır (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9). Kolon türü yay elemanları genellikle silindirik bir veya daha fazla elemandan oluşmaktadır. Yay elemanı eksenel yükler için tasarlanmıştır. Genellikle en az dört adet dirençli uzama ölçer ile tam köprü devresi oluşturacak şekilde bağlanırlar. Bunlardan iki tanesi eksenel yöndeki şekil değişimini hissetmek üzere boyuna, diğer ikisi ise Poisson şekil değişimlerini hissetmek ve negatif sinyalleri oluşturmak için eksene 90° dik olacak şekilde enlemesine yerleştirilirler. Farklı tasarımlar yardımı ile uygun şekilde tasarlanarak boyutlandırıldığında, bu tür elemanlar hem çekme hem de basma yüklemesi veya her ikisi için de kullanılabilirler.

Yüksek doğruluğa sahip bir kuvvet dönüştürücünün elde edilmesi amaçlandığında birçok parametrenin dikkate alınması gerekir. Örneğin, kolonun boyu kesitine oranla yeterince uzun tutularak dirençli uzama ölçerin yapıştırıldığı ölçme bölgesinde uç koşullarından etkilenmeyen düzgün bir birim şekil değişimi alanı oluşturulmalıdır. Bu koşul normal olarak kolon boyunun, en büyük kolon kesit köşegeninden en az beş kat daha büyük olması gereklidir.

Kolon türü kuvvet dönüştürücülerinin elastik bölgedeki doğrusal davranıştan sapmalar gösterdikleri üzerinde tartışılmaktadır. Doğrusal davranıştan sapma, çoğunlukla kolon elemanının kesit alanında yük altındaki deformasyonla oluşan değişimine dayandırılır. Bilindiği üzere, elastiklik modülü, çekme gerilmesi ile azalma, basma gerilmesi ile artma eğilimindedir. Elastiklik modülündeki bu küçük değişimler, sıradan malzeme özelliklerinin analizi için son derece küçük olmasına karşın dirençli uzama ölçerli dönüştürücülerde aranan hassasiyet için önemli olabilir. Elastiklik modülündeki değişimler üzerine daha kesin bilgilere ulaşılmamışken, en azından alan değişiminin neden olduğu doğrusallıktan sapma belirlenebilir. Dairesel kesitli bir kolon elemanı ele alındığında, kolondaki her bir $100 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik boylamasına birim şekil değişimi için alan değişiminden kaynaklanan doğrusallıktan sapmanın, yaklaşık olarak $\%0,003$ olduğu hesaplanmıştır.

Kolon türü yay elemanının doğrusallıktan sapma hatası incelendiğinde, bunun tam köprü devresini oluşturan dört dirençli uzama ölçerin aynı derecede etkin olmamasından kaynaklandığı görülür. Bu hata, köprü devresinin bir bacağındaki direnç değişimi, kendisini takip eden dirençte aynı miktarda ve ters yönde olmadığı zaman derhal ortaya çıkmaktadır.

Kolon türü bir yay elemanında da yük eksenine yapıştırılmış olan dirençli uzama ölçerler ile Poisson eksenine yapıştırılmış dirençli uzama ölçerlerin sinyalleri arasında yaklaşık 0,3 oranı olduğu için köprü çıkış sinyali daima doğrusallıktan sapma gösterecektir. Her türlü kuvvet dönüştürücüsüne uygulanmak üzere geliştirilen bir teknik ile dönüştürücünün doğrusallıktan sapması kompanze edilebilir. Uygulanan bu teknik ile yay elemanı üzerine ek bir dirençli uzama ölçer yapıştırılır ve tam köprü devresi yerine enerji kaynağı ile köprü devresi arasına seri bağlanır. Böylece bu dirençli uzama ölçer, doğrusallıktan sapma hatasını azaltacak yönde köprü besleme gerilimini ayarlamak için geri besleme olarak görev yapar.



Şekil 3.11. Dört adet kolon türü yay elemanı olan dönüştürücü

Her ne kadar kolon türü yay elemanları genellikle enine yönde küçük boyutlu iseler de büyük kapasiteler için çok uzun ve ağır yapıda da olabilirler. Küçük boyutlu ve yüksek kapasiteli kolon türü bir yay elemanı elde etmek için uygulanabilecek bir yaklaşım, yükün dört veya daha fazla sayıda her biri üzerinde kendi dirençli uzama ölçerleri bulunan küçük kolonlar tarafından taşınması şeklindedir (Şekil 3.11). Tüm bu kolonlarda birbirlerine karşılık gelen dirençli uzama ölçerler uygun köprü bacaklarıyla seri bağlanarak sonuçta küçük ebatlı ve aynı zamanda da eksen dışı yüklere karşı daha az hassas bir yay elemanıdır.

Kolon türü yay elemanı içi boş olarak da üretilebilir. Aynı net kesit alanı için (dolayısı ile tek eksenli yüklemelerde aynı esneklik için) içi boş silindirler daha büyük atalet momentine sahip olduklarından eğilme momentine karşı daha dayanıklıdır.

Yay elemanından istenen malzeme özellikleri

Daha önce bahsedildiği gibi, dirençli uzama ölçer bir kuvvet dönüştürücüsünün en kritik mekanik parçası yay elemanıdır. Yüke reaksiyon gösteren eleman çok yüksek nitelikteki yayların özelliklerini göstermek zorunda olduğu için, çoğu zaman oluşumundan bağımsız şekilde “yay” olarak adlandırılır. Bir dönüştürücü yay malzemesinin, kuvvet-deformasyon ilişkisinde, yüksek doğrusallık, düşük histerisiz ve küçük sürünme olarak beklenen özellikler dışında, onları konvansiyonel yaylardan ayıran temel özellik, deformasyon miktarıdır. Sıradan bir yay, yük altında oldukça büyük deformasyonlar verir.

Oysa tipik bir dönüştürücü yay elemanının elastik deformasyonu, dönüştürücünün boyutları ne olursa olsun, yalnızca 0.1 mm mertebelerindedir. Bu nedenle, dönüştürücü elemanları çok düşük esnekliğe ve yüksek hassasiyete sahip özel yaylardır.

Dönüştürücü yay elemanı birçok açıdan hassas bir yay gibi davranış göstermesine karşın, dirençli uzama ölçerlerin yerleştirileceği alanda, birim şekil değişiminin yeterince büyük ve düzgün olduğu yüzeylere sahip fiziksel yapıda olmak zorundadır. Genellikle dönüştürücünün toplam elastik deformasyonunun en aza indirilmesi gerektiğinden, dirençli uzama ölçerlerin yapıştırıldığı alan hariç, tüm yapı içinde gerilme seviyesini olabilen en düşük seviyeye indirebilmek amacıyla yay elemanı tasarımına özen gösterilmektedir.

Yay elemanının deformasyonunun en aza indirilmesinin esas nedeni, daha önce açıklanmış olan dönüştürücünün doğal frekansının en yüksek olması içindir. Bir diğer neden ise yükleme anında yükü ileten ve yükü taşıyan tüm konstrüksiyonun yay ile seri bağlanmış olmasıdır.

Ayrıca, dönüştürücü yay elemanının seçiminde büyük özen gösterilmesi gerekli diğer bir konu da, malzeme özelliklerinin imal edilecek olan dönüştürücünün performansını ve maliyetini doğrudan etkilemesidir. Bu seçim işlemi, mekanik özellikler, ısı özellikler ve imalat özellikleri olarak üç aşamalı değerlendirilecektir.

1. Mekanik özellikler

Bir dönüştürücü çıkış sinyalinin doğrusallıktan sapması, malzeme davranışının yanında başka nedenlere de bağlı olabilir. Ancak, yüksek doğruluklu bir dönüştürücü yapabilmek için öncelikle mekanik açıdan uygun özelliklere sahip bir yay elemanı malzemesi ile başlanmalıdır. Dönüştürücü doğruluğunun belirlenmesindeki en önemli mekanik özelliklerden birisi malzemenin elastik alandaki doğrusallığıdır. İdeal olarak, dönüştürücünün tam yük kapasitesine karşılık gelen yüke kadar olan alanda, yay malzemesinin gerilme ile birim şekil değişimi arasında tam doğrusal ilişkiye sahip

olmasıdır. Birçok dönüştürücü tasarımında gerilme ile birim şekil değişimi ilişkisinde eğimin çekme yönünde olduğu kadar basma yönünde de aynı şekilde olması aranan bir diğer özellik olmaktadır.

Yay malzemesi, çalışılan tüm gerilme aralığı boyunca tam elastik davranış göstermeli ve tersinebilirlik (histerisiz) değeri çok düşük olmalıdır. Böylelikle, her hangi bir ölçüm serisinde, hem artan hem de azalan ölçümler yapıldığında aynı gerilme için aynı birim şekil değişimi elde edilmelidir. Benzer şekilde, belirli bir yük uygulanıp zamanla sabit tutulduğunda, şekil değişimi de zamanla sabit kalabilmeli yani yay malzemesi sürünme göstermemeli veya bu özeliği olabildiğince düşük olmalıdır. Bir diğer seçim kriteri ise, ele alınan mekanik özelliklerin tekrarlı yüklemelerde zamanla kendisini tekrarlayabilmesidir.

Metallerin akma mukavemeti ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini veren tablolar, yay elemanı olarak kullanılacak olan malzemelerin performansının belirlenmesinde doğrudan kullanılamazlar.

Bu tablolarda verilen değerler en çok yükleme altında dönüştürücüde oluşan şekil değişimi seviyesinin çok ötesindeki değerler için geçerlidir. Özellikle, aşırı yükleme sırasında göstereceği davranış ele alındığında, yay elemanı malzemesinin yapısal özellikleri çok önem taşıyabilmektedir.

Kuvvet dönüştürücülerinin, belirli bir hasar oluşmadan önce tam kapasitesinin üzerindeki yüklere dayanması istenmektedir. Bu tür beklentiler için akma mukavemeti ve ilgili özelliklerin titizlikle değerlendirilmesi gerekir. Eğer öngörülen aşırı yükleme altında herhangi bir hasar oluşumu engellenmek isteniyorsa; malzeme, dişli bağlantılar gibi gerilme yoğunluğunun bulunduğu bölgelerde hasar oluşumunu önlemek için yeterince sünek ve tok olmalıdır. Bu nedenle, sertliği 50 HRC'nin üzerinde olan çeliklerin yay elemanlarında kullanımı çok nadir olup kullanımı önerilmez. Sertlik değerinin artması, yay malzemesi özelliklerini iyileştirirken, kırılabilirliği de arttırdığı bilinmektedir.

Bir kuvvet dönüştürücüsünün çok sayıda yüklemelerde kullanılması öngörüldüğünde, iyi tasarlanmış bir yay elemanında yorulma mukavemeti ve özellikleri ikinci değerlendirme parametresi olarak görülür. Çünkü uzama ölçerin yorulmaya karşı olan hassasiyeti önemli sınırlayıcı bir parametredir. Yay elemanında, uzama ölçerin yerleştirildiği bölgede oluşan en büyük şekil değişimine bağlı olarak (ki bu şekil değişimi uzama ölçerin kullanım ömrünü de belirler) elemanda yorulma riski olmamalıdır.

Dönüştürücü yay elemanında özel olarak aranan elastiklik özellikleri, malzeme seçimi aşamasında elastiklik modülüne (Young modülü) özel bir önem kazandırmaktadır. Bu amaçla, yay elemanı olarak uygun olabilecek çeşitli malzemeleri yüksek veya düşük elastik modüllü malzemeler olarak sınıflandırmak uygun olacaktır. Bu malzemelerin uygulama alanlarını birbirinden ayıran kesin bir kriter olmadığından yüksek elastik modüllü malzemeler (örnek çelik) genel olarak büyük kapasiteli

kuvvet dönüştürücüleri için, düşük elastik modüllü malzemeler (alüminyum ve demir esaslı olmayan malzemeler) ise daha düşük kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinde kullanılmaktadır.

Ayrıca kuvvet dönüştürücüsü üzerinde dirençli uzama ölçerlerin yerleştirileceği yerlerde yeterince yüksek (1000 - 1700 $\mu\text{m/m}$) birim şekil değişimlerinin elde edilebilmesi sağlanmalıdır. Yüksek kapasiteli dönüştürücülerde boyutları uygun tasarlanmış çelik elemanlarla bu koşulları yerine getirmekte bir sorun yoktur. Ancak, kapasite düştükçe dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda malzeme kalınlığı azaltılarak, gerekli birim şekil değişimi seviyesine ulaşılmaktadır. Bununla beraber, dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda çok ince kesitlerin varlığı, dönüştürücü performansını olumsuz yönde etkileyen çeşitli etkilere yol açmaktadır.

Dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildikleri ince kesitler, eleman içerisindeki ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir.

Dirençli uzama ölçerin yerleştirildiği bölgedeki uygunsuz ince kesitlerde ısı akışı belirli bir sıcaklık farkı yaratabilir ve bu fark dirençli uzama ölçerin bulunduğu noktada daha da büyüktür.

Böyle bir durum dirençli uzama ölçer çıkış sinyalini etkiler. Aynı zamanda da kesitte ısıl gerilmeler oluşturarak bölgesel bir şekil değişimi farklılığı da yaratabilir.

Düşük kapasiteli yay elemanlarında daha kalın kesitler elde etmenin en etkili yollarından birisi, alüminyum alaşımları gibi düşük elastiklik modülüne sahip malzeme kullanımıdır.

2. Isıl özellikler

Yay elemanının mekanik özellikleri normal çalışma koşullarında yani oda sıcaklığı olarak tanımlanan + 21°C'de geçerlidir. Bir dönüştürücünün yüksek veya düşük sıcaklıklarda kullanılması istendiğinde, tasarımında malzemenin istenen sıcaklığındaki mekanik özellikleri mutlaka değerlendirilmelidir.

Bunların dışında, yüksek veya düşük çalışma sıcaklığı dönüştürücünün performansında doğrudan etkilidir. Örneğin, yay elemanının ısı iletim özelliği dönüştürücünün doğrusallığını ve tekrarlanabilirliğini belirleyen en önemli etkenlerden biri olarak kabul edilir. Yay elemanında oluşabilecek sıcaklık farklılıkları, dönüştürücü çıkış sinyalinde düzensiz ve hatalı sonuçlara neden olabilir. Sonuç olarak yay elemanı, mekanik özellikleri kadar sahip olduğu ısı iletimi özellikleri de dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Herhangi bir tasarımda, içeriden veya dışarıdan etkiyen ısıl girdilerin etkisi altında eleman içindeki sıcaklık farklılıkları, malzemenin ısıl iletkenliği ile ters orantılı olarak değişmektedir. Dolayısıyla ısıl iletkenlik özelliği yay malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken önemli olan özelliklerdendir.

Malzemenin ısıl genleşme katsayısı, her ne kadar yaygın olarak literatürde yer alıyorsa da yay malzemesi seçiminde birinci dereceden etkin rol oynamamaktadır. Dönüştürücü çıkış sinyali üzerinde, ısıl genleşmenin birinci dereceden etkileri, köprü devresinde kendinden sıcaklık

kompanzasyonlu dirençli uzama ölçerler kullanılarak ortadan kaldırılmaktadır. Dönüştürücüler üzerinde 60°C'lik bir değişim % 0,1 ila 0,2 seviyesinde bir etki yaratabilir. Dönüştürücü çıkış sinyali üzerindeki bu etkilerinin yalnızca yay malzemesinden mi yoksa diğer etkilerden mi kaynaklandığını belirlemenin olanağı yoktur. Bu nedenle, sıcaklık değişiminden kaynaklanan tüm etkileri içeren bir düzeltmenin uygulanması gerekmektedir.

Malzemelerin elastiklik modülü sıcaklık ile değişim gösterebilmektedir. Metaller için her 60°C'lik değişim için bu değerdeki azalma % 1 ila 3 seviyesindedir. Bu etki, sıcaklık yükseldikçe dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalinin de artmasına neden olur. Dönüştürücülerde kullanılmak üzere sıcaklıkla değişim göstermeyen elastiklik modülüne sahip özel alaşımlar geliştirilmiş olması da soruna tam bir çözüm getirememiştir. Bunun nedeni, dirençli uzama ölçerin k-sabitinin de sıcaklıkla değişmesi olup dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalinin doğrudan etkilenmesidir. Sıcaklıktan kaynaklanan dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalindeki değişimleri kontrol etmek amacıyla çeşitli düzeltme yöntemleri kullanılmaktadır.

3. Üretim özellikleri

Yay malzemesinin mekanik ve ısı özelliklerine ek olarak ele alınması gereken faktör olarak üretim özellikleri de bulunur. İmalat için en önemlisi malzemenin talaşlı işlenebilme kabiliyetidir. Günümüz dönüştürücülerinin birçoğu oldukça karmaşık şekillerde talaşlı işlenmesi gereken yay elemanlarına sahip olacak biçimde tasarlanmaktadır.

Yay elemanı tercihen tek parça malzemedan işlendiğinden girintili çıkıntılı tasarımlarda hassas işleme gerektirmekte olup alaşımın işlenebilirliği, dönüştürücünün performansını ve maliyetini etkilemektedir.

Bazı dönüştürücülerin tasarımlarında, yay elemanının birden fazla parçadan üretilmiş olması, kaynak veya lehim yoluyla elemanların yay elemanına bağlanması gerekebilmektedir. Böyle bir durumda, malzeme özellikleri kaynak veya lehim ile bağlanan parçalardan veya çok parçalı konstrüksiyonun getirdiği olumsuz etkilerden dolayı etkilenecektir. Yay malzemesinin seçimine etkiyen bir diğer faktör de malzemenin öngörülen üretim koşullarına uygun miktar, şekil ve boyutta ticari olarak var olup olmadığıdır. Her ne kadar ikincil olarak değerlendirilse de, malzeme maliyetleri yapılacak olan seçimi etkileyebilir. Sertleştirme işlemi sırasında herhangi bir çarpılma veya bozulmaya uğramama, bir alaşımda aranan temel üretim özelliklerinden birisidir. Yay malzemesi olmaya uygun birçok alaşım yalnızca sertleştirilmeden önce işlenmektedir. İstenilen mekanik özelliklerin oluşması için yüksek sıcaklıkta bir ısı işlem gerekiyorsa, orijinal şekil üzerinde ciddi çarpılmalar ve bozulmalar oluşabilmektedir. Ayrıca dönüştürücü şeklinin hem kalın hem de ince kesitler içermesi durumunda önemli sorunlarla karşılaşmaktadır.

Hiç bir yay elemanı tek başına her türlü uygulama için ideal çözüm olamayacağından, mekanik, ısı ve üretim özelliklerini bir arada değerlendirerek yay malzemesi seçimi yapılmalıdır. Belirli bir uygulama için en uygun yay malzemesi, istenen özelliklere göre dönüştürücünün başarısını belirleyen kriterlerle, uygulamaya özel önceliklerin karşılıklı olarak değerlendirilmesi ile belirlenir. Buradaki sınırlamalar, yük kapasitesi, şekil ve boyut, işletme koşulları, üretim miktarı ve maliyet sayılabilir.

Yay malzemesi seçimi

Dönüştürücü yay elemanı malzemesi seçiminde kullanılmak üzere Tablo 3.6'daki verilerden yararlanılabilir. Tablodaki malzemeler yüksek elastiklik modüllü malzemeler, düşük elastiklik modüllü malzemeler ve diğerleri olmak üzere üç ana grupta toplanmıştır. Malzemelerin mekanik özellikleri, doğrusallık, histerisiz ve sürünme gibi özellikleri için 1 den 10'a kadar bağlı puanlanmış performans değerlendirilmelerine yer verilmiştir. Bu puanların yüksekliği o özelliğin istenen seviyeye yakınlığının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Tabloda yer alan tüm değerler normal koşullar altında kullanılan malzemeler için, oda sıcaklığındaki değerleridir.

Bu tablo, malzeme seçiminde bir ön eleme şeklinde kullanılmalı, ardından o malzemenin mekanik özellikleri imalatçı firmadan istenmelidir. Olanaklar ölçüsünde tüm bu veriler kontrol edilmelidir. Malzemelerin birbirlerine göre göreceli değerlendirmelerindeki puanlama daha çok imalatçı ve tasarımcıların deneyimine dayanmakta olup burada genel bir fikir vermesi amaçlanmıştır.

Yüksek elastik modüllü malzemeler, genel olarak orta ve yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücü üretimlerinde kullanılan çelik malzemelerdir.

AISI 4140 ve AISI 4340 düşük alaşımlı çelikler yıllardır yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinin yay elemanlarında kullanılmaktadır. Dönüştürücünün boyutlarının büyük olduğu ve sertleştirme ısı işlemi gerektiğinde çarpılma olasılığı düşük olan bu çelikler oldukça iyi birer çözüm olarak gözükmektedir. Maraging çelikleri de bugün için kullanılmakta olan en popüler, yüksek elastisite modüllü yay malzemeleri arasındadır. Günümüzde paslanmaz çelik grubundaki malzemelere giderek artan bir oranda yönelme söz konusudur. Bu grupta daha çok tercih edilen çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerdir (17-4 PH ve 17-7 PH). Bunlar sertleştirilmeden önce ve sonra rahatça işlenebilir, ardından oldukça düşük sıcaklıkta uygulanan ısı işlemler ile çok düşük çarpılma oranına sahiptirler. Bu çeliklerin oksidasyona karşı dirençleri de dönüştürücü tasarımındaki önemli üstünlüklerinden birisidir. Ancak, bu çeliklerin en önemli sakıncası düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olmaları ve diğer malzemelere nispeten maliyetlerinin az miktarda yüksek olmasıdır.

Günümüzde en yaygın kullanılan düşük elastik modüllü malzemeler, ısı işlem (yaşlandırma) uygulanabilir alüminyum alaşımlarıdır. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılanları 2024-T6 ve 2024-T351 kodlu alüminyum alaşımlardır. Ancak, tümü içinde en iyi özelliklere 190°C civarında yaşlandırılan 2024-T81 kodlu alaşımın sahip olduğu görülmektedir. Toplam performans

değerlendirildiğinde Be-Cu alaşımı düşük elastik modüllü malzemeler içinde en iyi performansı vermektedir. Malzemenin pahalı olması yanında, işlenirken de sıcaklığın Berilyum üzerindeki olumsuz etkileri olacağı düşünülerek gerekli önlemler alınmalıdır. Çeşitli, titanyum alaşımlarının da yay malzemesi olarak iyi sonuç vermesine karşın, fiyatlarının yüksekliği ve ısıl işlem den sonra belirgin çarpılmaların oluşması en büyük sakıncalarıdır. Ayrıca, olumlu özellikleri de çok düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları nedeniyle bir anda önemini yitirebilmektedir.

Diğer malzeme grubunda yer alan Mg alaşımları, düşük elastisite modüllü uygulamalar için kullanılabilir. Ancak, şu an için mevcut Mg-alaşımları, çok zayıf yay malzemesi özelliği göstermeleri ve mekanik özelliklerinin zamanla değişmesi nedeniyle nadiren kullanım alanı bulmaktadır. 18-8 kodlu ostenitik paslanmaz çelik (AISI 304) çok iyi oksidasyon direncine sahip olmasına karşın ısıl işlemlerle sertleştirilemediğinden dolayı sınırlı olarak kullanılmaktadır. Ni-Span-C alaşımı özellikle hassas yaylar için geliştirilmiştir. Uygun bir ısıl işlemle elastisite modülü geniş bir sıcaklık aralığında değişmez duruma gelebilmektedir. Ancak, bu özelliğin dirençli uzama ölçer uygulamalarında çok büyük önemi yoktur.

İlk değerlendirmede mekanik özellikleri açısından iyi bir yay malzemesi gibi gözükse de yüksek maliyet ve işleme güçlükleri nedeniyle pek tercih edilmemektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, her ne kadar yapılarındaki plastik matris zamana bağlı bazı değişimler oluştursa da, günümüz uygulamalarında her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu alanda elde edilen gelişmeler kompozit malzemelerin başlangıçta küçük kuvvet dönüştürücülerinin düşük ve orta sınıf doğruluğuna sahip olanları için kullanılabilecekleri yönündedir.

Tablo 3.6. Kuvvet dönüştürücü yay elemanları için malzeme seçim tablosu

Kuvvet Dönüştürücü Yay Elemanı için Malzeme Seçim Tablosu																		
MALZEME	Özellikler								Karşılaştırma tablosu								Kullanımı	
	Elastik Modülü GPa	Akma dayanımı (% 0.2), Mpa	Isıl Genleşme Katsayısı ppm/°C	Yoğunluk, g/cm³	En yüksek kullanım sıcaklığı, °C	Isıl iletkenliği, watt/m °C	Kopma uzaması, %	Rockwell C sertliği, (HRC) (Aksi belirtilmedikçe)	Isıl iletkenliği	Doğrusallık	Histerisiz	Sürünme	Maliyet	İşlenebilirlik	Sertleşmede çarpılma	Korozyon dayanımı		Kaynak ve lehimle uygunluk
a) Yüksek Elastik Modüllü Malzemeler																		
AISI 4140 Çeliği	207	1380	11,7	7,84	204	38,9	12	42-45	3	8	8	7	9	5	3	1	5	İyidir ve yaygın kullanılır
AISI 4340 Çeliği	207	1449	11,3	7,84	260	37,4	12	43-46	3	8	8	8	8	5	3	1	5	Çok iyidir ve yaygın kullanılır
18 Ni (250) maraging çelik	186	1691	10,1	8,01	316	20,2	7-10	48-49	2	8	8	7	4	5	8	2	8	İyidir fakat nadir kullanılır
410 paslanmaz çelik	200	966	10,8	7,76	204	24,5	15	39	2	7	7	6	7	4	2	6	2	Nadir kullanılır
630 paslanmaz (17-4 PH) çelik	197	1277	10,8	7,76	204	19,4	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	Yaygın kullanılır
631 paslanmaz (17-7 PH) çelik	200	1518	10,3	7,65	204	18,7	6-7	46-48	2	8	8	7	6	6	8	7	7	Yaygın kullanılır
632 paslanmaz (15-7 PH Mo) çelik	200	1518	9,0	7,67	260	15,8	6	47	2	8	8	8	4	6	8	7	7	Çok iyidir fakat nadir kullanılır
S15500 paslanmaz (15-5 PH) çelik	197	1277	10,8	7,76	204	19,4	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	630 çeliğinin gelişmişidir
b) Düşük Elastik Modüllü Malzemeler																		
2014-T6 alüminyum alaşımı	73	414	22,3	2,80	93	155	10	B 135	8	6	7	6	5	8	9	3	3	İyidir
2024-T4/T351 alüminyum alaşımı	73	317	22,7	2,80	93	121	18	B 120	7	6	7	6	5	8	9	3	3	İyidir ve yaygın kullanılır
2024-T81 alüminyum alaşımı	73	449	22,7	2,80	121	150	8	B 128	8	7	8	7	5	8	9	3	3	Al. Alaşımları içinde en iyisidir
6061-T6 alüminyum alaşımı	69	276	23,2	2,71	66	167	14	B 95	8	5	4	4	6	7	8	4	5	Düşük performans gösterir
7075-T6 alüminyum alaşımı	72	483	23,2	2,80	38	121	10	B 150	7	7	6	6	5	8	8	3	2	Yüksek sıcaklıkta kullanılmaz
BeCu (C 17200) alaşımı	117	1173	16,7	8,25	121	108	2-3	40-42	7	8	8	8	2	5	9	3	4	Çok iyidir fakat ekonomik değildir
Ti-6Al-4V Titanyum alaşımı	114	1139	8,82	4,43	149	7,2	12	40	1	7	7	7	2	3	2	8	4	Özel uygulamalar içindir
c) Diğer Malzemeler																		
AISI 304 paslanmaz çelik (18-8)	193	1035	17,3	8,14	121	15,8	4-5	39	2	5	4	4	7	3	(C)	8	5	Nadir kullanılır
Ni-Span-C alaşımı*	193	1242	7,7	8,14	121	13	9	37-38	1	8	8	8	3	3	4	3	5	Çok iyi fakat pahalıdır
AZ31B magnezyum alaşımı	45	221	26,1	1,77	38	93,6	15	B 73	6	3	2	2	6	8	(C)	1	7	Çok zayıf bir malzemedir
Seramik, Al ₂ O ₃	380	450	5,9	3,91	260	37,4	(A)	Mohs:9	3	7	8	8	1-3	1	(C)	10	-	Özel uygulamalar içindir
Epoksi- cam laminat	34-48	480-690	9,0 - 14,4	1,66 - 1,94	38 - 93	0,29	-	0	0	5	4	3	5	3	(C)	4	-	Özel ve düşük doğruluklu uygulamalar içindir.
1- Karşılaştırma tablosunda 0-10 arasında verilen puanlar içinde en yüksek puan en istenen durumu göstermekte olup özellikler oda sıcaklığı için verilmiştir. 2- (A) malzemenin çok gevrek olduğunu ve (C) malzemenin ısı işleme sertleştirilmediğini göstermektedir. Sertlik verilenler B ile gösterilenler ise Brinell sertlik değerini ifade etmektedir.																		
* Ni-Span-C alaşımı % 42 Ni, % 5 Cr, % 2,5 Ti alaşımı ve kalanı Fe'den oluşmaktadır.																		

1- Karşılaştırma tablosunda 0-10 arasında verilen puanlar içinde en yüksek puan en istenen durumu göstermekte olup özellikler oda sıcaklığı için verilmiştir.

2- (A) malzemenin çok gevrek olduğunu ve (C) malzemenin ısı ile sertleştirilemediğini göstermektedir. Sertlik verilirken B ile gösterilenler ise Brinell sertlik değerini ifade etmektedir.

* Ni-Span-C alaşımı % 42 Ni, % 5 Cr, % 2,5 Ti alaşımı ve kalanı Fe'den oluşmaktadır.

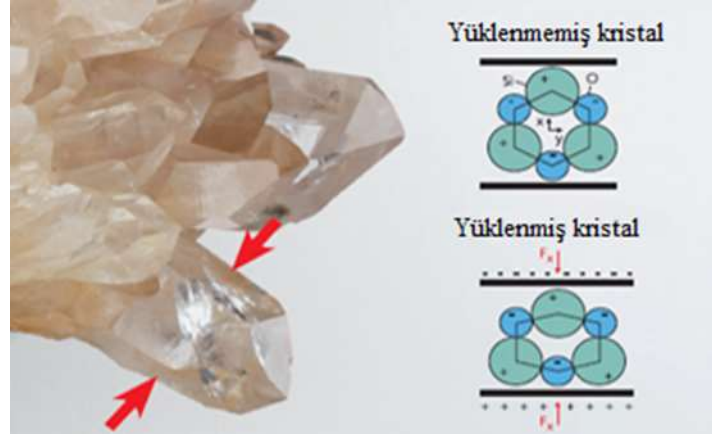
3.2. Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, piezoelektrik etki ile oluşan elektriksel yüklenmeden sinyal oluşturarak kuvvet ölçümünü sağlayan sistemlerdir.

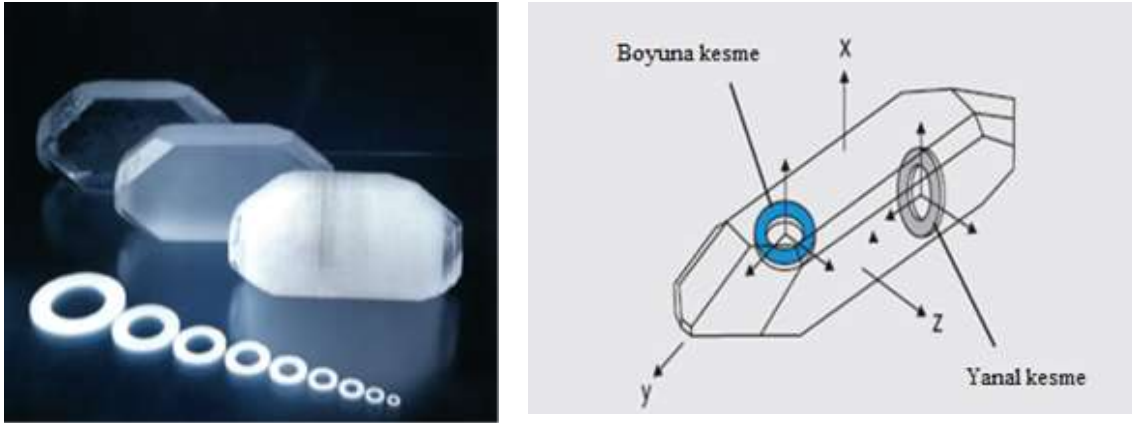
Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, piezoelektrik kuvvet sensörü ve yükleme sinyalini bir voltaj sinyaline dönüştüren yükleme amplifikatörü olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Bunlar alt kısımlarda detaylandırılmıştır.

Piezoelektrik etki, piezoelektrik malzemelere (kuvars gibi) tesir eden kuvvet neticesinde pozitif veya negatif elektrik yüklerinin meydana gelmesidir (Şekil 3.12). Bazı seramikler piezoelektrik etki gösterse de kullanılan ana malzeme kuvarstır. Bu malzemedan kesilmiş bir diske kuvvet uygulanır ve deforme olursa uç düzlemler arasında bir gerilim oluşur. Kuvars kristali, doğal olarak piezoelektriksel yapıya sahiptir ve uygulanan kuvvete tepki olarak doğrudan elektriksel yük üretir.

Piezoelektrik kuvvet sistemlerinin çoğu, ince kristal disklerden oluşan bir ölçüm sensörü ile çalışır. Sensörlerde ölçülmesi istenen kuvvete bağlı olarak kristal disklerin kesme açıları değişir. Boyuna kesmeyle üretilen kristal diskler, basma kuvvetlerini ölçen sensörlerde kullanılır. Yanal kesmeyle üretilen kristal diskler ise kesme kuvvetlerini ölçen sensörlerde kullanılır (Şekil 3.13).



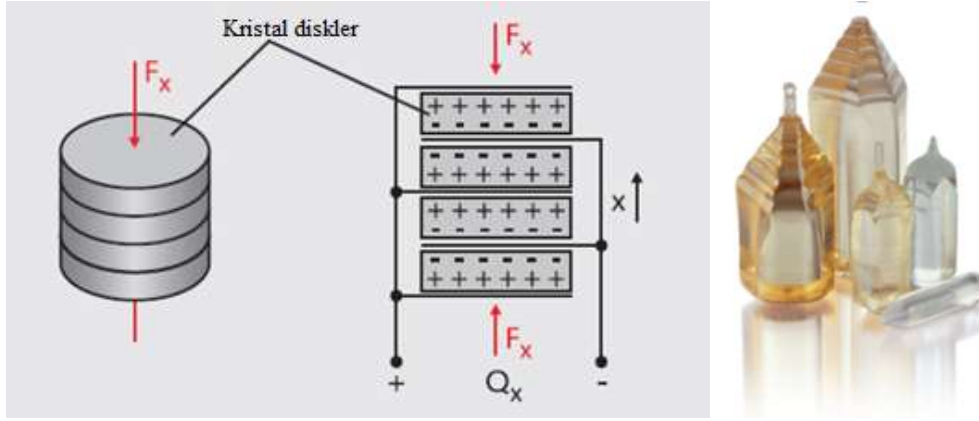
Şekil 3.12. Kristal üzerindeki mekanik yük nedeniyle elektrik üretimi



Şekil 3.13. Ölçüm elemanı olarak kristal diskler, kristalde olası kesme açıları

Tek kristal disk tarafından üretilen elektrik yükü yalnızca piezoelektrik malzemeye bağlı olup geometrik boyutlarına bağlı değildir. Daha yüksek hassasiyete sahip sensörler üretmek için belli sayıda kristal disk birbiri üzerine konumlandırılabilir. Paralel biçimde elektriksel olarak bağlanabilir veya alternatif olarak daha yüksek hassasiyetli piezoelektrik malzemeler de kullanılabilir (örneğin, piezostar kristalleri) (Şekil 3.14).

Piezostar kristaller kuvarstan daha yüksek hassasiyet ve daha iyi sıcaklık kararlılığı sunan özel kristallerdir. Ancak piezostar kristalleri, genel olarak çok küçük kuvvetleri ölçmesi istenen sensörlerde kullanılır. Kuvars bazlı kuvvet sensörleri ise daha büyük kuvvetleri ölçmek için uygundur. Bununla birlikte kuvars bazlı kuvvet sensörlerinin tercihinde hassasiyet, sıcaklık kararlılığı ve ölçülebilecek kuvvet kapasitesi de önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3.13. Yükleme verimini artırma olasılığı; piezostar kristalleri

Tek sensör üzerinden okunabilecek kuvvet bileşeni ve/veya moment sayısına göre farklı piezoelektrik kuvvet sensörleri bulunmaktadır.

a.) Bir Bileşenli Sensörler

Bir bileşenli sensörler, bir kuvvet bileşenini ölçer yapıya sahiptir. İki farklı tipi vardır (Şekil 3.14):

- Basma ve/veya çekme kuvvetleri için kuvvet sensörleri ($\pm F_z$)
- Kesme kuvvetleri için kuvvet sensörleri ($\pm F_y$)

b.) İki Bileşenli Sensörler

İki bileşenli sensörler, basma ile çekme kuvvetlerini ($\pm F_z$) ve aynı zamanda karşılık gelen pozitif ve negatif momentleri ($\pm M_z$) ölçebilmektedir (Şekil 3.15).

c.) Üç Bileşenli Sensörler

Üç bileşenli sensörler, birbirine dik üç kuvvetin tümünü (F_x , F_y ve F_z) aynı anda ölçebilmektedir. Bu sensörler, her iki kayma yönündeki ($\pm F_x$ ve $\pm F_y$) pozitif ve negatif kayma kuvvetlerinin yanı sıra basma ve çekme kuvvetlerini ($\pm F_z$) de algılayabilmektedir (Şekil 3.16).

d.) Dinamometreler (Üç Bileşenli)

Dinamometreler, temel olarak bir taban plakası ile kapak plakası arasına monte edilmiş dört tane üç bileşenli sensörden oluşur. Bu nedenle dinamometre birbirine dik üç kuvveti (F_x , F_y ve F_z) ölçebilmektedir. Üç bileşenli sensörler tarafından ölçülen üç kuvvet bileşenine ve dört sensörün bilinen geometrik pozisyonuna göre momentler (M_x , M_y ve M_z) de hesaplanabilmektedir (Şekil 3.17).



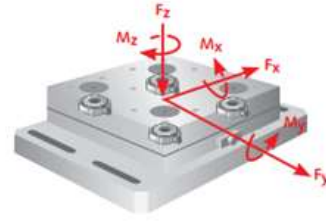
Şekil 3.14: Bir bileşenli sensör



Şekil 3.15: İki bileşenli sensör



Şekil 3.16: Üç bileşenli sensör



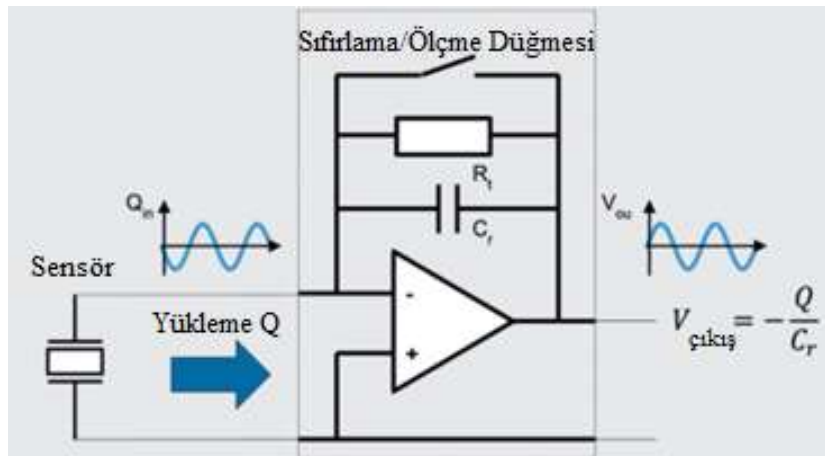
Şekil 3.17: Üç bileşenli dinamometre

Yüklemeye Amplifikatörleri (Gösterge Sistemleri)

Kuvvet sensörleri, yük altında negatif bir yük oluşturur. Yüklemeye amplifikatörü, piezoelektrik sensörün kuvvet etkisi ile ürettiği negatif elektrik yüklerini uygulanan kuvvetle orantılı olan pozitif bir voltaja dönüştürür.

Yüklemeye amplifikatörü üç ana bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin prensip şeması verilmiştir (Şekil 3.18).

- 1) **Aralık kapasitörü (Cr)**, yüklemeye amplifikatörünün ölçüm aralığını ayarlamak için kullanılır. Bu işlem farklı aralık kapasitörleri arasında geçiş yapılarak gerçekleştirilir. Dolayısıyla 100 N ve 100 kN aralığındaki kuvvetleri ölçmek için sadece ölçüm aralığını değiştirerek aynı kuvvet sensörünü kullanmak mümkündür.
- 2) **Zaman sabiti direnci Rt**, yüklemeye amplifikatörünün zaman sabitini tanımlar. Frekans aralığında zaman sabiti, yüklemeye amplifikatörünün sınır frekansını (cut-off frequency) belirler.
- 3) **Sıfırlama/Ölçme düğmesi**, ölçümün başlangıcını kontrol etmek veya sıfır noktasını ayarlamak için kullanılır. Çalışma prensibi nedeni ile piezoelektrik ölçüm teknolojisi, mutlak sıfır referanslı ölçümlere izin vermez.



Şekil 3.18: Bir yüklemeye amplifikatörünün devre şeması

Uygun bir yükleme amplifikatörü seçmek için en önemli 4 adet seçim kriteri şunlardır:

1.) Kanal sayısı

Kullanıcı kendi tercihinine uygun kanal sayısını belirler.

2.) Ölçüm aralığı

Kullanıcı sensörüne ve kendi tercihinine uygun ölçüm aralığını belirler.

3.) Ölçüm türü

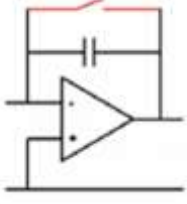
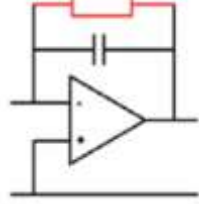
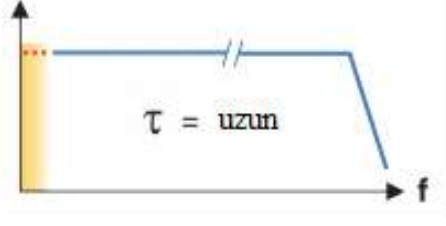
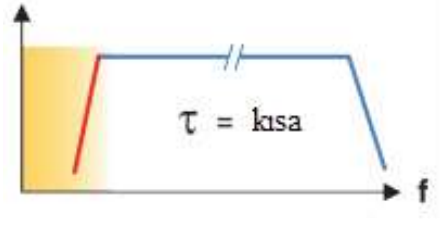
Ölçüm türü, yükleme amplifikatörünün düşük frekans aralığındaki davranışını belirler ve yükleme amplifikatörünün temel bir bileşeni olan zaman sabiti direnci veya zaman sabitinden etkilenir. Zaman sabiti, yükleme amplifikatörü için sınır frekansını ve böylece ölçüm türünü belirler.

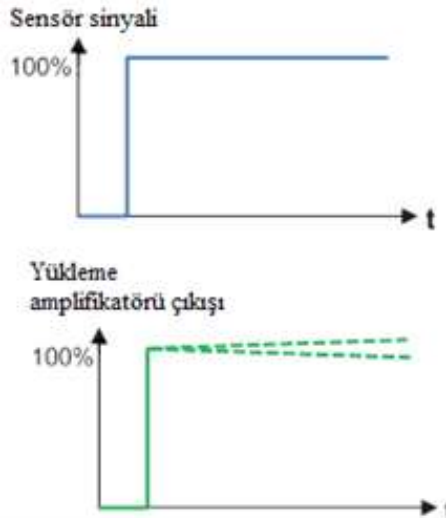
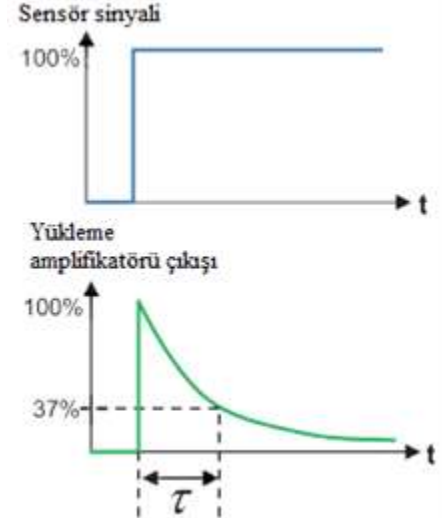
Piezoelektrik kuvvet ölçüm sensörleri iki farklı ölçüm türünde kullanılabilmektedir. Bunlar:

- 1) Yarı-statik ölçüm
- 2) Dinamik ölçüm

Bu ölçümler arasındaki farklılıklara Tablo 3.7’de yer verilmiştir.

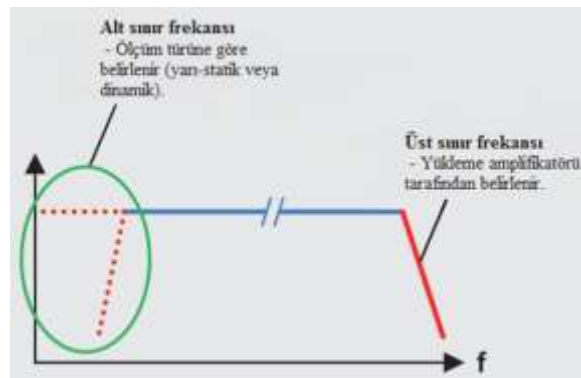
Tablo 3.7: Yarı-statik ve dinamik ölçüm yöntemleri arasındaki farklar

Yarı-statik Ölçüm	Dinamik Ölçüm
	
• Zaman sabiti ‘Uzun’ (zaman sabiti direnci yok). • Davranış DC kapsam modu ile karşılaştırılabilir.	• Zaman sabiti ‘Kısa’ (zaman sabiti direnci var). • Davranış AC kapsam modu ile karşılaştırılabilir.
• Frekans aralığındaki davranışı: 	• Frekans aralığındaki davranışı: 

• Zaman aralığındaki davranışı:  → Çalışma prensibinin neden olduğu sapma, daha uzun ölçüm sürelerinde görünür hale gelir.	• Zaman aralığındaki davranışı:  → Zaman sabiti nedeniyle sapma olmaz.
• Ölçüme başlarken sıfır noktası belirlenir. • Ölçüme başlama Sıfırlama/Ölçme düğmesi ile kontrol edilir.	• Zaman sabiti nedeni ile sıfır noktası referans alınmadan ölçüm yapılır. • Sıfırlama/Ölçme sinyali gerekli olmayabilir veya yükleme amplifikatörü her zaman ölçüm modunda çalıştırılır.

4.) Frekans aralığı

Bir yükleme amplifikatörünün frekans aralığı, alt ve üst sınır frekansları ile tanımlanır (Şekil 3.19). Alt sınır frekansı, ölçüm türü (yarı statik veya dinamik) ile tanımlanır. Üst sınır frekansı, sisteme bağlı nedenlerden dolayı tüm yükleme amplifikatörü tarafından belirlenir. Bu nedenle üst sınır frekansı yalnızca yükleme amplifikatörünün tasarımına bağlı olup ölçüm türüne bağlı değildir. Çoğu kuvvet uygulamasında doğal frekans 10 kHz aralığındadır. Bu nedenle yükleme amplifikatörü için 20 - 40 kHz aralığında bir üst sınır frekansı birçok uygulama için yeterlidir.

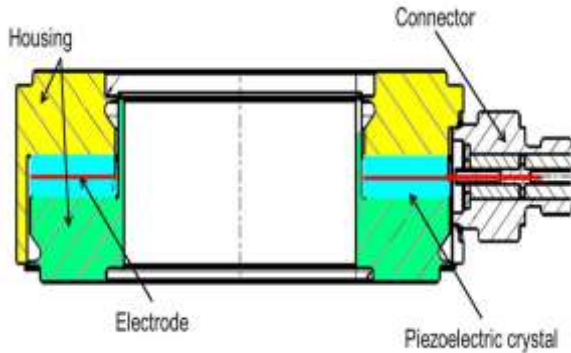


Şekil 3.19: Yükleme amplifikatörünün frekans aralığı

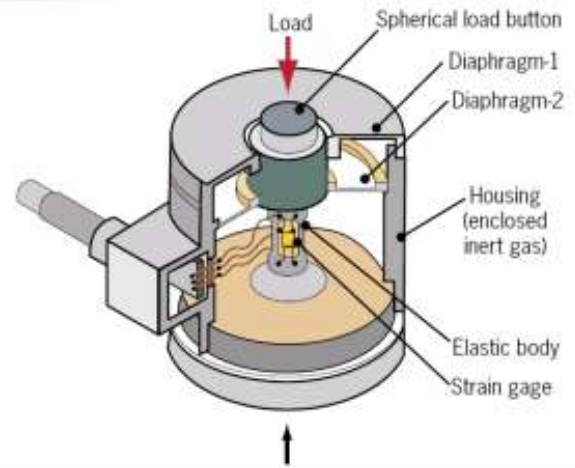
Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Avantajları ve Dezavantajları

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, dinamik ölçüm çalışmalarında yüksek rijitlikleri ve sertlikleri sayesinde yük altında çok az deformasyona uğrar. Böylece dinamik uygulamalar için yaygın olarak tercih edilir. Farklı uygulama alanlarında hızlı üretim sistemlerine adapte edilen bu cihazların avantajları; hatalı üretimlerin tespiti, % 100 üretim kontrolü, zaman, enerji ve işçilik tasarrufu sağlaması ve verimin artırılması şeklinde sıralanabilir.

Günümüzde direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları, statik uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme sensörleri olup mekanik deformasyonun elektriksel çıktıya dönüştürülmesinden dolayı bu ismi almıştır. Yüksek doğruluğa sahip olmaları ve otomasyon sistemlerine uygunlukları açısından yaygın olarak statik uygulamalarda kullanılmaktadır. Piezo elektrik ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazı yapıları Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de görülmektedir. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının avantaj ve dezavantajlarının daha iyi bir biçimde ortaya koyulabilmesi için direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları ile karşılaştırılması Tablo 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Piezo elektrik kuvvet ölçme cihazı içyapısı



Şekil 3.21. Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazı içyapısı

Tablo 3.8: Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının karşılaştırılması

Kriter	Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları	Direnç Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları
Statik ölçümler için daha doğru sonuçlar	-	+
Dinamik ölçümler için daha doğru sonuçlar	+	-
Geniş ölçüm aralığı	+	-
Statik ölçümlerde yüksek ön yükleme ile çok küçük kuvvet değişimlerinin ölçümü	+	-
Çok bileşenli kuvvet sensörleri için uygun sensör boyutları	+	-
Döngüsel yüklemelerde ömür	+	-
Aşırı yüklenebilme kabiliyeti	+	-
Yüksek sıcaklığa uygunluk	+	-
Sıcaklık değişimlerine uygunluk	-	+
Kablo kullanımı (temizlik, düşük ses)	-	+
Doğrusallık	-	+
Kalibrasyon aralığı	+	-

(+ işaretler avantajları – işaretler ise dezavantajları temsil etmektedir.)

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının sayısal veriler kullanılarak yapılmış bir karşılaştırılması da Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9: Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının sayısal veriler ile karşılaştırılması

Teknoloji	Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları	Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları
Hassasiyet	80 pC/μe	0,003 mV/μe
Algılama hassasiyeti	0,00001 μe	0,01 μe
Ölçüm aralığı	1000000000	1000000
Hacim	< %5	% 100
Doğrusallık	% 1	% 0,05
Kablo sayısı	2 tel	min. 4 tel

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ile ölçüm yapılırken kuvars kristalin yapısı nedeniyle yer değiştirme miktarı çok azdır.

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının hassasiyeti, genellikle kullanılan kristal malzemesine ve geometriye bağlı olarak değişmektedir. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının yüklenme miktarları (26) bağıntısı ile hesaplanır:

$$Q = q_{11} \cdot n \cdot F \quad (26)$$

Burada Q üretilen elektrik yükü, q_{11} malzeme sabiti (örn. 4,3 pC/N), n seri bağlanmış kuvars kristali sayısı ve F kuvvettir.

Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları ile direnç uzama ölçerdeki (strain gauge) direnç değişimini elde etmek için elastik deformasyonda geçerli olan Hooke Kanunu kullanılır. Dirençteki değişim (27) ve (28) bağıntıları ile hesaplanabilir:

$$F = E \cdot A \cdot \varepsilon \quad (27)$$

Burada E elastisite modülü, A kesit alanı, ε şekil değişimi ve F kuvvettir.

$$\Delta R/R = k \cdot \varepsilon \quad (28)$$

Burada ΔR yük altındaki direnç değişimi, R yük altında değilken direnç ve k direnç uzama ölçerin ölçü faktörüdür.

Uygulama alanına göre kullanımı uygun düşecek kuvvet ölçme cihazı, avantajları ve dezavantajları göz önüne alınarak belirlenmektedir. Temel uygulama alanları; otomotiv, endüstriyel işlemler ve sensör teknolojileri olan piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının kullanım alanları için ayrıntılı bilgi referanslarda yer almaktadır.

Ölçüm cihazının avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesindeki en önemli hususlar statik kuvvet ölçümü veya dinamik kuvvet ölçümü olması durumudur. Bu sebeple bu iki ölçüm türü alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

Statik Kuvvet Ölçümü

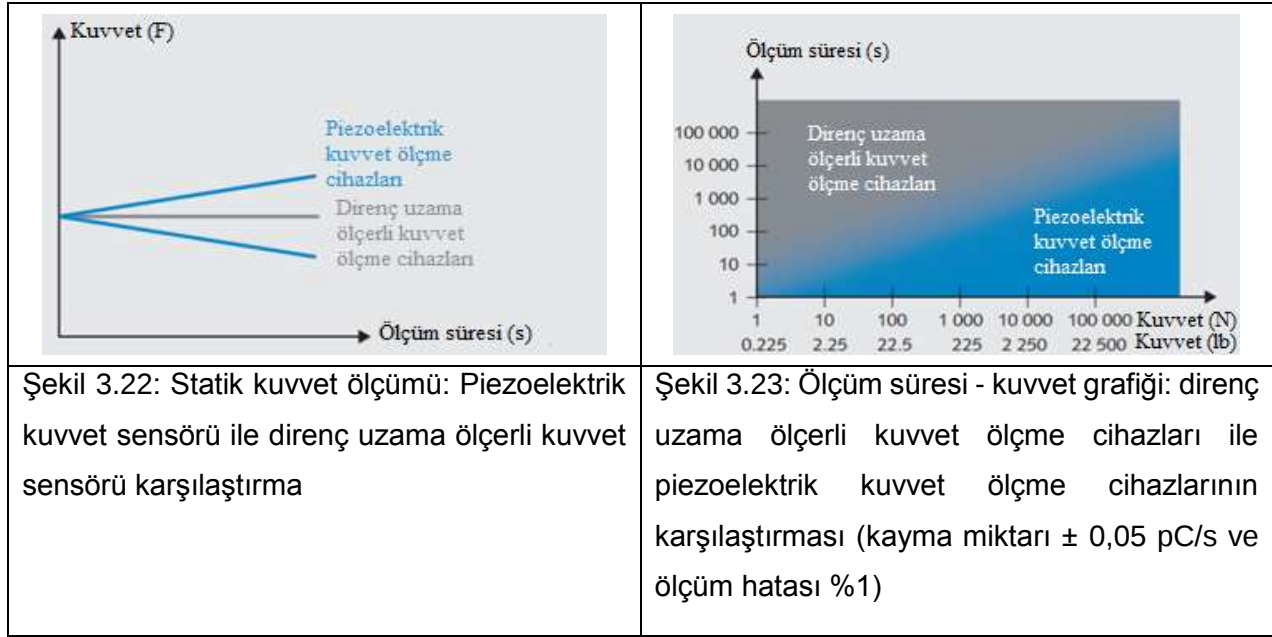
Çalışma prensibinden dolayı piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarına statik bir yük uygulandığında çıkış sinyalinde küçük bir kayma meydana gelir. Buna karşılık direnç uzama ölçer prensibine sahip cihazlar daha kararlı bir çıkış sinyali üretir (Şekil 3.22).

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarına statik bir yük uygulandığında meydana gelen kaymanın neden olduğu bağıl ölçüm hatası, küçük kuvvetlerin uzun bir süre boyunca ölçülmesini zorlaştırır. Uzun ölçüm periyotları boyunca büyük statik kuvvetlerin ölçümünde ise sorun oluşturmadığı görülmüştür. Bu nedenle piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ile yapılacak ölçümler; ölçüm süresine, doğruluğa ve ölçülecek kuvvete bağlıdır. Statik ölçüm için piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının kullanılıp kullanılmayacağını veya direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının kullanımının uygun olup olmadığı verilen grafikte gösterilmektedir (Şekil 3.23).

Grafikten anlaşıldığı üzere eğer kuvvetler yeterince büyükse uzun ölçüm süreleri için piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları uygun olmaktadır. Bununla birlikte, direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları ise uzun ölçüm süreleri için tercih edilmelidir.

Dinamik Kuvvet Ölçümü

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, sertlikleri sayesinde yük altında çok az deformasyona uğramaları nedeniyle dinamik uygulamalar için tercih edilebilmektedir. Bu genellikle dinamik uygulamalar için olumlu olan yüksek rezonans frekansı sağlamaktadır.



3.3. Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları

Bilim ve teknolojiye gelişmeler, jiroskop sistemlerine de yansarak uygulamaları ve cihaz türlerini etkilemiştir. Bu bölümde temel jiroskop yapısı incelenmiş, jiroskopik kuvvet ölçme cihazları ve farklı türlerdeki cihazların sistemleri ele alınmıştır.

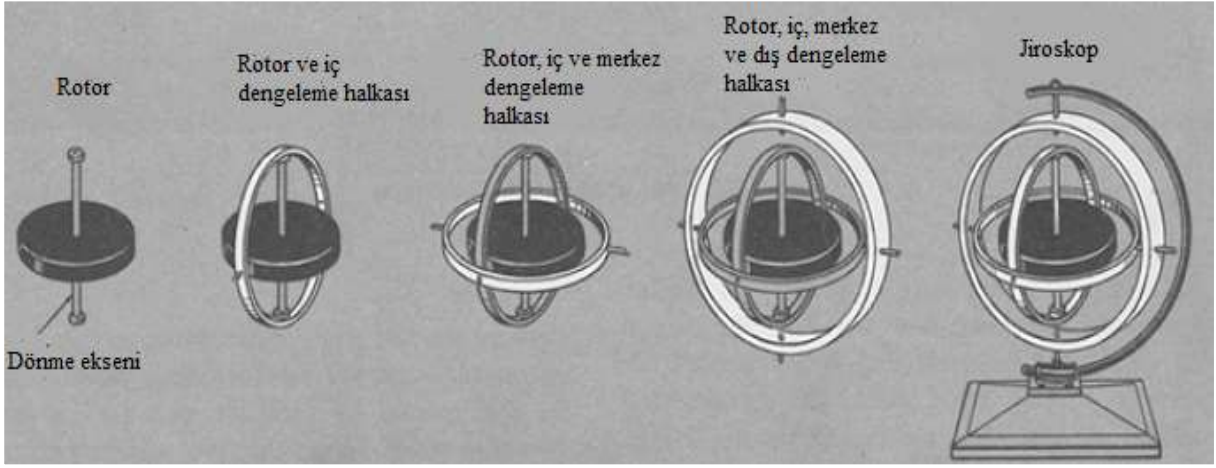
Temel Jiroskop Yapısı

Jiroskop; iç içe mafsallı halkalardan ve en içteki halkaya ekseninden mafsallı döner bir diskten oluşan yön bulmak için kullanılan mekanik bir cihaz olarak tarif edilir. Düzdöner, cayroskop gibi farklı adlarla da anılmakta olsa da en yaygın kullanılan adlandırma jiroskoptur. Bu sebeple bu bölümde jiroskop adı tercih edilmiştir.

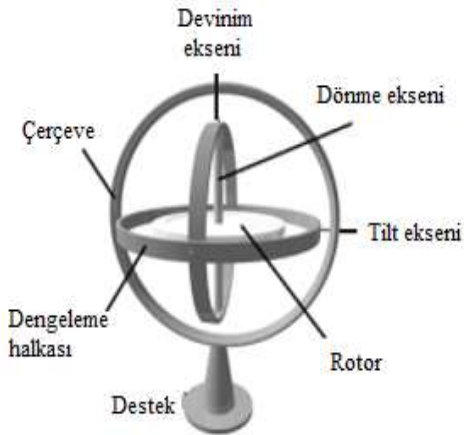
Jiroskoplar, açısal momentumun korunumu ilkesine göre çalışan cihazlardır. Alışlagelmiş jiroskoplar eksen etrafında dönüşü sağlayan rotor ve dengeleme halkalarından (gimbal) oluşur (Şekil 3.24). Ancak bazı jiroskoplarda dış dengeleme halkasının kullanılmadığı durumlar da görülebilir (Şekil 3.25).

İç dengeleme halkası üzerinde yukarı doğru uygulanan bir kuvvetin Y-Y eksenindeki bir yaya uygulandığı Şekil 3.26'da görülmektedir. Uygulanan bu kuvvet, jiroskopik atalet direncine karşıdır ve jiroskopun Y-Y eksenini etrafında dönmesine engel olur. Rotor saat yönünde dönerken itme uygulanan kuvvet noktasından saat yönünde 90° olacak şekildedir. Jiroskop Z-Z eksenini etrafında ok yönünde hareket eder. Şekil 3.26'da verilen jiroskop üzerindeki hareketlerin tanımları şu şekilde yapılabilir:

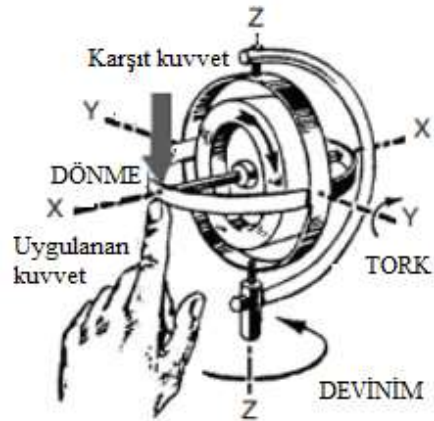
- Dönme (dönüş) - jiroskop rotorun açısal hızı,
- Tork - rotor ekseninin yönünü değiştirmek için uygulanan döner hareket,
- Devinim - tork uygulandığında dönme eksenindeki değişim



Şekil 3.24. Rotor, iç ve dış dengeleme halkalarına sahip bir jiroskop



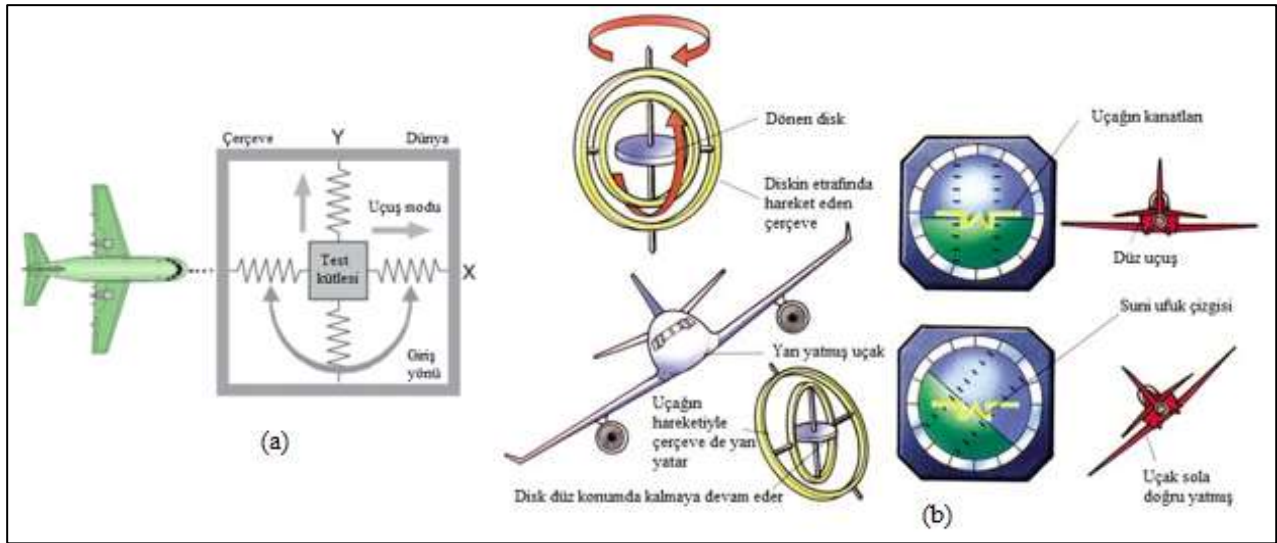
Şekil 3.25. Dış dengeleme halkası bulunmayan bir jiroskop



Şekil 3.26. Jiroskopun üzerinde oluşan kuvvetlerin şematik gösterimi

Jiroskopun diğer hareket algılayıcılarına göre en dikkat çeken özelliği, hareketsiz bir zeminden referans almadan dönmeyi hassas bir şekilde ölçebilmesidir. Aynı zamanda jiroskop, Dünya'nın dönüşünden bağımsız olarak yönelimini koruyabilen bir cihazdır.

Bu özellikler sayesinde kara, hava, deniz ve uzay araçlarının açısal hareketlerini algılayan navigasyon sistemlerinde jiroskoplardan faydalanılabilmektedir. Şekil 3.27.a ve 3.27.b'de bu kullanıma yönelik bir uygulama verilmektedir. X yönünde hareket eden bir uçak, Dünya (bu sistem için çerçeve) Z yönünde dönerken Y yönündeki coriolis (koryolis) kuvvetinden etkilenir. Z eksenindeki herhangi bir açısal hız, Y ekseninde ikinci bir hareketi tetikler. Döndürülmüş çerçevede dikey yönde herhangi bir Coriolis (koryolis) kuvveti algılanırsa test kütlesi belirli bir yönde salınım hareketi yapar (Şekil 3.27a). Jiroskop sistemleri ile de yön tayini yapılır (Şekil 3.27b).



Şekil 3.27. Jiroskopun navigasyon sistemlerinde kullanımı

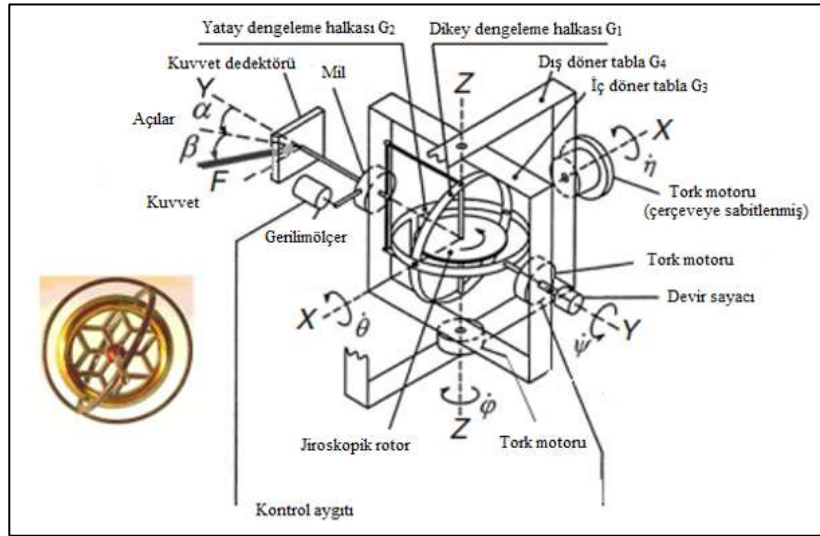
Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları

Temel olarak jiroskopik kuvvet ölçme cihazı, jiroskopların açısal momentum korunumu ilkesine göre çalışması ile dengeleme halkalarında (gimbal) oluşan hareket süresinden kuvvetin büyüklüğünün ölçüldüğü sistemlerdir. Ancak bu temel yapı ve tanımlama dışında farklı tür jiroskopik kuvvet ölçme cihazları mevcuttur. Bu cihazların döner sistemleri bulunmasa da farklı yapıları sayesinde hareket algılayabilmeleri, jiroskoplara benzer bir özellik olduğu için jiroskopik kuvvet ölçme cihazları olarak adlandırılmaktadır. Farklı tür jiroskopik kuvvet ölçme cihazlarının yapıları farklı olsa da en temel olanı anlamak, diğer cihazları da daha anlaşılır kılacaktır. Bu sebeple bu bölümde temel jiroskopik kuvvet ölçme cihazlarına yer verilmiştir.

Temel yapıdaki bir jiroskopik kuvvet ölçme cihazı, dairesel bir dengeleme halkası veya kare çerçeve sistemine monte edilmiş bir jiroskopun kuvvete duyarlı olma özelliğinden yararlanır. Cihaz, iki dengeleme halkasından oluşan sistemin iç çerçevesine monte edilmiş mil üzerinde dinamik olarak dengelenmiş bir rotor içerir. Jiroskopik sensörler tarafından ölçülecek kuvvet, alt dönme ekseninden uygulanır.

İç çerçevede bir çift dönme üretilir ve bu da dengenin bozulmasına neden olur. Dış dengeleme halkasının bir dönüşü tamamlaması için geçen süre, uygulanan kuvvetin bir ölçüsüdür.

Şekil 3.28'te bir Jirooskopik Kuvvet Ölçüm Cihazı (GFMS) görülmektedir. Kuvveti vektörel olarak ölçmek için jirooskop etrafına servo mekanizmalar ile çalışan iki yardımcı döner tabla yerleştirilir. Burada kuvvet vektörünün geliş açılarını takip etmek için döner tabladan alınan çıktılara ihtiyaç vardır. Dikey eksen ile dengeleme halkalarına monte edilen jirooskopik rotor, sabit bir hızla döner ve OY eksenini döndürür. Rotoru destekleyen dikey dengeleme halkası (G_1), yatay dengeleme halkasına (G_2) göre OX ekseninde dönmekte serbestken yatay dengeleme halkası (G_2), iç döner tablaya (G_3) göre OY ekseninde dönmekte serbesttir. G_2 , döner kolun bir ucunu dikey olarak destekler. Bu kolun diğer ucu rotorun dönme ekseninin bir ucunda G_1 üzerine monte edilir. Jirokopu destekleyen iç döner tabla (G_3) ve dış döner tabla (G_4), sırasıyla G_4 ve OZ ile OX çerçevesine göre dönmekte serbesttir. Ölçülecek olan kuvvet, dönme boyunca manivela merkezinin ortasına vektörel olarak etki eder ve bu nedenle rotorun dönme ekseninin bir ucuna, α ve β gibi bilinmeyen açılarda yatay bir bileşen kuvveti uygulanır.



Şekil 3.28. Dış ve iç dengeleme halkalarına sahip jirooskopik kuvvet ölçme cihazı

Kuvvet ölçümünü doğru şekilde gerçekleştirmek ve bozulmaları önlemek için iki telafi yöntemi mevcuttur:

- **Yükün hareket etmemesi:** Ölçülecek, aşağı doğru olan yük yönü, yatay düzlemde ortaya çıkan hareketlerden birine dik açıdır. Jirokop, çok çeşitli yüklerin hareketsiz kuvvet dengesi ölçümünü sağlar. Bu nedenle manivela sistemi histerezis ve doğrusallıktan bağımsızdır. Bu sayede cihazın çalışması, tork motorunun kullanımıyla kontrol edilir ve dönme sürtünmesinden de etkilenmez.

- **Dinamik olarak dengeli kuvvet:** Devinim oranı, doğrudan uygulanan yüke göre değişmektedir. Bu nedenle jirokop uygulanan çiftteki hassas değişikliklere neredeyse anında tepki vererek doğrudan titreşim sinyalleri üretir.

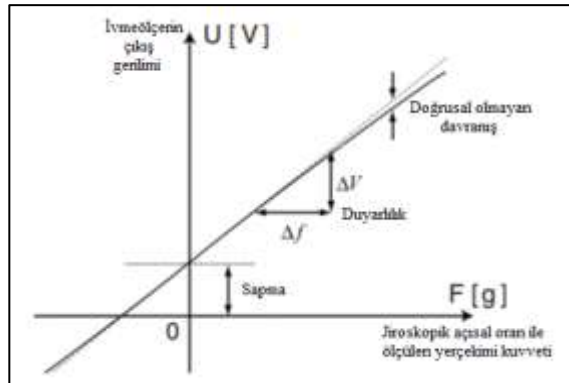
Yapısında yay veya denge ağırlığı bulunmadığından tepki verme süresi minimum ölçüm süresi 0,5 s ile karşılaştırıldığında mikro saniyeler seviyesindedir. Bu sebepten histerisiz eksikliği ve yüksek tepkime hızı nedeniyle cihazın titreşiminden kaynaklanan reaksiyon kuvvetlerinden de etkilenmezler.

a) Mikro Jirooskopik Kuvvet Ölçme Cihazları

Mikroelektro mekanik sistem (MEMS) esaslı çalışan bu cihazlar, genellikle literatürde mikrojiroskopik kuvvet ölçme cihazları olarak adlandırılmaktadır. Bu cihazlar, türlerine göre alt başlıklar ile verilmiştir.

1) Atalet Jiroskoplar

Düşük maliyetli bir evrensel navigasyon uydu sisteminde [global navigation satellite system (GNSS)] kullanılmak üzere mikroelektro mekanik sistemler (MEMS) dönüştürücü tabanlı bir eylemsizlik ölçüm birimi [inertial measurement unit (IMU)] oluşturulmuştur. Kalibrasyon, ivmeölçer için mekanik bir platform gerektirmez. Fakat jirooskop için basit bir döner tabla gerekir. Önerilen kalibrasyon yöntemleri, ideal bir özellik yani uygulanan kuvvetin büyüklüğüne ve dönme hızına karşılık gelen ivme ölçer ile jiroskoptan ölçülen çıktıların oranını kullanır. Atalet jiroskopları, algılanan ivme ve açısal hız ile orantılı olarak bir voltaj üretir. Bu durumun bir sonucu olarak atalet jiroskoplarında duyarlılık (S_G), $S_G = \frac{\Delta U}{\Delta F}$ ile ifade edilmektedir. Bu bağıntıdaki değişkenler Şekil 3.29'da verilmiştir.

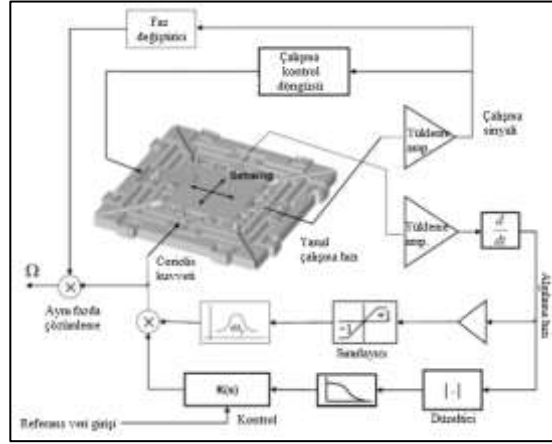


Şekil 3.29. Atalet jiroskoplarının duyarlılık oranı

2) Piezoelektrik jiroskoplar

Piezoelektrik jiroskoplar, sistemin eylemsizlik referans çerçevesine göre açısal dönüşünü coriolis (koriyolis) prensibi ile ölçmektedir. Piezoelektrik jiroskopların eksenleri, piezoelektrik kristallerden oluşmaktadır. Böylece piezoelektrik jiroskoplar, birbirine dik iki eksen üzerindeki dönme hızını hassas bir biçimde ölçebilmektedir. Şekil 3.30'da çalışma prensipleri için bir blok diyagramı verilmiştir.

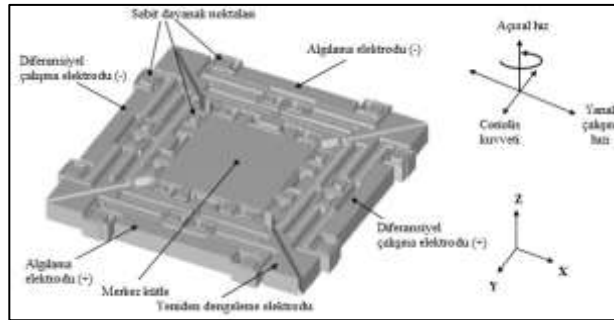
Bu sisteme göre X ekseninde salınım oluşturan bir kuvvet ve Z eksen boyunca uygulanan bir açısal hız neticesinde, Y ekseninde coriolis ivmesi sayesinde oluşan kuvvet, geri besleme kontrol sistemi vasıtasıyla dengelenir. Alt döngü kuvvet, üst döngü ise yanal salınım içindir. Yükleme amplifikatörünün çıkış sinyali, yer değiştirmeye orantılı olduğundan döngüde taşınan hız sinyalini elde edebilmek için bir analog cihaz kullanılır. Böylelikle döngü sayesinde mekanik coriolis kuvvetine eşdeğer bir kuvvet oluşturulur.



Şekil 3.30. Piezoelektrik jiroskop yapısı

3) Rezonatör/Titreşimli Jiroskoplar

MEMS jiroskopları, diğer mikro jiroskopların çoğunda olduğu gibi rotasyonu algılamak için titreşimli mekanik elemanlar kullanır. Bu elemanlar, coriolis ivmesinin neden olduğu iki titreşim modu arasındaki enerjinin transferine göre çalışır. Diyapazonlar ve titreşen kirişlerdeki değişiklikler ile farklı türlerde titreşimli jiroskoplar (VSGs) üretilmiştir (Şekil 3.31). Bu jiroskoplar balistik füzeler için rehberlik sistemlerinde kullanılabilir.



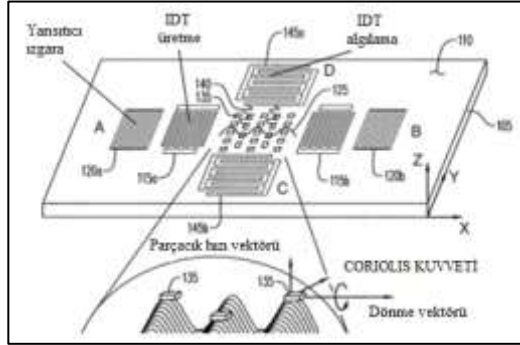
Şekil 3.31. Titreşimli jiroskop yapısı

4) Akustik ve Yüzey Akustik Dalgalı (SAW) Jiroskoplar

Akustik jiroskoplar, ses dalgalarını kullanmaktadır. Giriş ve çıkış sinyallerinin karşılaştırılması esasına göre çalışır. Yayılan sesin elektriksel olarak üretilmesiyle faz farklarını tespit etmek için girişim ölçer gerekmez.

Giriş ve çıkış sinyalleri doğrudan karşılaştırılır. Ancak ses hızının sıcaklığa büyük ölçüde bağlı olması nedeni ile bu cihazların kalibrasyonları zordur.

Yüzey akustik dalgalı (SAW) olan jiroskoplar, iki çapraz yüzey akustik dalgasının girişim etkilerine göre çalışan cihazlardır (Şekil 3.32). Yüzey akustik dalgalarının birisi coriolis kuvvetinin giriş rotasyonu tarafından diğeri ise aynı çalışma frekansına sahip yüzey akustik dalgalı cihazdan gelir. Yüzey akustik dalgalı jiroskoplar, akustik jiroskoplara göre daha gelişmiş cihazlardır.



Şekil 3.32. Yüzey akustik dalgalı jiroskop yapısı

b) Optik Jiroskoplar

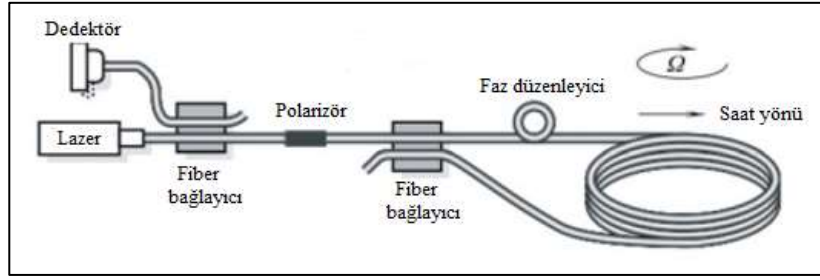
Optik bilimi esasına göre çalışan bu cihazlar, literatürde optik jiroskoplar olarak adlandırılmaktadır. Bu cihazlar, türlerine göre alt başlıklar ile verilmiştir.

1) Fiber Optik Jiroskoplar (FOGs)

Fiber optik jiroskoplar, fiber malzeme kullanılarak iki dalganın zıt yönlerde yayılmasıyla oluşan faz farkının ve hassasiyetin artırıldığı optik sistemlerdir.

Kapalı devre kuvvet geri besleme sistemleri, yüksek hassasiyet potansiyeline sahiptir ve optik jiroskopik sistemlerde de kullanılmaktadır. Kapalı devre kontrol sistemleri, kütle konumunun kuvvet geri beslemesi ile kontrol edilmesine dayanmaktadır. Gereken kuvvet, yükün büyüklüğüne göre sağlanır.

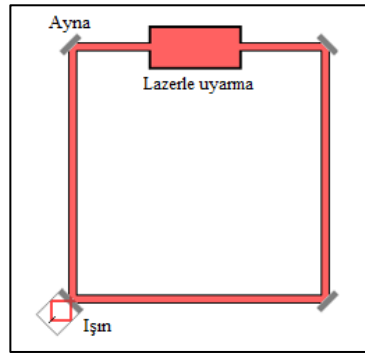
Şekil 3.33'de gösterilen fiber optik jiroskop, bir ışık kaynağı ve fiber optiğe birleştirilmiş bir dedektörden oluşmaktadır. Işık polarizörü, her iki ışının da fiber optik bobin içinde aynı yolu izlemesini sağlamak için dedektör ve iki fiber optik bağlayıcı arasına yerleştirilmiştir. İki ışın rotasyonel olarak uyarılır ve faz değişimi sebebiyle detektöre çarpar. Bu tür bir optik jiroskop, rotasyona duyarlı ve küçük bir sensördür.



Şekil 3.33. Fiber optik jiroskop yapısı

2) Lazer Jiroskop

Işının faz farkını, dijital olarak ölçülen bir frekans farkına dönüştüren sistemlerdir. Bu sistemlerde uyarma için lazer ve aynalar da kullanılmaktadır.



Şekil 3.34. Lazerli jiroskop

Lazer jiroskoplar, fiber optik jiroskoplarla karşılaştırıldığında daha küçük, daha hafif ve daha az maliyetlidir. Ayrıca dönmeye daha duyarlıdır.

3) Mikrooptik Elektro Mekanik Sistem (MOEMS) Jiroskopu

Mikroelektro mekanik sistemler ile optik sistemlerin birlikte çalıştığı cihazlardır.

MOEMS jiroskopları, fiber optik ve halka lazerli jiroskoplarla karşılaştırıldığında MOEMS jiroskopları, küçük ebat ve hafiflik avantajlarına sahiptir. Literatürde rezonans (RMOG) ve girişimsel mikrooptik jiroskoplar (IMOG) olarak sınıflandırılmaktadır.

Geçmişten Günümüze Jiroskop Uygulamaları

Jiroskoplar, kuvvet ölçme cihazlarının haricinde daha birçok alanda kullanılmıştır. Bu bölümde bu uygulama alanlarıyla ilgili bir derleme yapılmıştır.

Modern jiroskop teknolojisinin performans ve uygulamalarının gelişimi 19. yüzyıl ortalarında başlamıştır. Başlangıçta gelişimleri donanma ve havacılık uygulamalarında olan bu mekanik sistemler, özellikle Birinci Dünya Savaşı sırasında gemileri yönlendirmek ve kendinden güdümlü füzeler için büyük kullanım alanları bulmuştur.

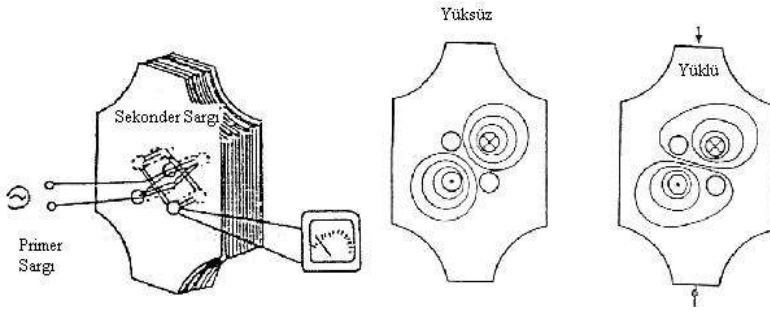
Sistemleri geliştirmek için ilk olarak elektronik donanımlar eklenmiştir. 1970'lerde ortaya çıkan halka lazerli jiroskoplar (RLG) ve fiber optik jiroskopların (FOG) gelişimi uzun yıllar boyunca devam etmiştir. Hassas olmakla birlikte karışık olan bu tasarımlar, havacılık, taşınabilen hedef belirleme sistemleri ve üç ayak (tripod) sistemleri dahil olmak üzere çok çeşitli navigasyon uygulamalarında kullanılmıştır.

MEMS jiroskopları, ilk kullanılmaya başlandığından bu zamana kadar önemli gelişmeler kaydetmiştir. Piyasa talebini, sağlamlık ve kalite düzeyi bakımından yeterli olarak karşıladığı söylenebilmektedir. Araç fren sistemlerinin elektronik denge kontrolünde de jiroskoplar kullanılmıştır. Ayrıca tek kişilik taşıyıcılar [segway (ginger)], dronlar, akıllı telefonlar ve IOT [nesnelerin interneti (internet of things)] cihazları da MEMS jiroskoplarının kullanıldığı alanlardandır. Endüstriyel uygulamalarda geri bildirim kontrolünün gerekli olduğu sistemlerin çoğu, MEMS jiroskopları ile donatılmıştır. Robot kullanımı ve fabrika taşıma sistemleri gibi endüstriyel otomasyon uygulamaları bunlara örnektir.

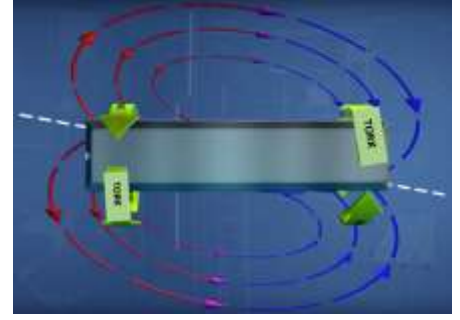
Boyut, güç ve maliyetin azaltılması teknolojik uygulamalar için önemli hususlardır. Fiber optik jiroskoplar, benzer performans ve boyutlara sahip bir teknoloji olan halka lazerli jiroskopların düşük maliyetli sürümleri olarak düşünölebilir. Buna bağlı olarak fiber teknolojisindeki gelişmeler, yüksek performanslı fiber optik jiroskopların tasarlanmasına zemin hazırlamaktadır. Fiber optik jiroskoplar ve MEMS jiroskopları için de benzer bir durum geçerlidir. Ürünün fiyatını etkileyen en önemli unsurlardan biri, jiroskopların performans derecesini etkileyen sapmadır. Fiber optik jiroskopların sapması, MEMS jiroskoplarından daha düşöktür. Bu nedenle taktiksel uygulamalar için daha uygundur.

3.4. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları

Bu tip kuvvet ölçme cihazları, uygulanan kuvvetle manyetik özelliklerinin değişmesinden faydalanarak ölçüm yaparlar. Temel olarak iki özelliklerinden faydalanılır. Bunlardan ilki manyetik anizotropi, diğeri ise manyetik geçirgenlikteki değişimidir. Kuvvet ölçüm cihazlarında daha çok manyetik geçirgenlik özelliği kullanılıp, silisyumlu çelik yapraklar üstöste konularak elastik cismin şekli oluşturulur. Yeni primer ve sekonder sargılar birbirleri ile dik açı oluşturacak şekilde plakalara monte edilir. şekil 3.35'de göröldüğü gibi, elastik cisme kuvvet uygulanması manyetik geçirgenliğin yönlü karakteristiğini değiştirir ve sekonder sargıda çıkış voltajı oluşturur. Yumuşak çelik ve ferroalüminyum gibi magnetoelastik malzemeler, manyetik geçirgenliğin değişimini belirleyecek şekilde tasarlanmışlardır. Bu tip yük hücreleri, yüksek AC voltajı verdiklerinden yüksek bir kullanılrlığa sahiptirler.



Şekil 3.35. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazı



Şekil 3.36. Tork bir ferromanyetik şafta uygulandığında, şaftın etrafında manyetik bir akı oluşumu

Manyetik ve mekanik davranışlar birbirine bağlantılıdır. Manyeto elastik dönüştürücüler, uygulanan gerilim nedeniyle manyetik bir malzemede uyarılan manyetik akının değişmesine dayanan Joule etkisi prensibine göre çalışır. Şekil 3.36'da gösterilen tork gibi harici kuvvet takip eden gerilimden kaynaklanır. Manyeto elastisitenin etkisi, genellikle gerilme nedeniyle malzemenin manyetik geçirgenliğindeki bir değişiklik olarak tanımlanır.

Ferromanyetik malzemelerin manyeto elastikliği, mıknatıslanma sırasında şekil ve hacim değişikliklerinde kendini gösterir ve manyetik bir gövdenin elastomekanik gerilmesinin, manyetizasyon eğrilerinin tersine çevrilebilir değişikliklere yol açar. Başka bir deyişle, bir kuvvet dönüştürücünün manyeto elastik elemanına uygulanan yükleme, manyetik devresinin özelliklerini değiştirmektedir.

Tablo 3.10'da, manyeto elastik doğrudan ve ters etkiler gösterilmiştir. Tabloda kuvvet (Villary) veya tork (Matteucci) dönüştürücüleri için yararlı manyeto elastik etkiler büyük harflerle belirtilmiştir.

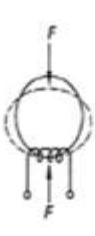
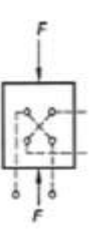
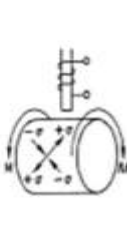
Tablo 3.10. Manyeto elastik etkiler

Doğrudan etkiler	Ters etkiler
Joule manyetostriksiyon (1842) Uygulanan manyetik alan doğrultusunda numune boyutlarının değiştirilmesi.	VILLARY ETKİSİ Uygulanan mekanik stres nedeniyle manyetik duyarlılıkta değişiklik
Manyetoanizotropi etkisi Manyetokristalin anizotropiye manyetoelastik katkısı.	ΔE etkisi Elastisite modülünde manyetik olarak indüklenen değişiklikler
Wiedemann etkisi Helisel manyetik alan anizotropunun neden olduğu bükülme	MATTEUCCI ETKİSİ Bir torkla indüklenen helisel anizotropi ve elektromotor kuvveti
Magnetovolume etkisi Mıknatıslanma nedeniyle hacim değişikliği (çoğunlukla Curie sıcaklığına yakın).	Nagaoka-Honda etkisi Hacimdeki bir değişiklik nedeniyle manyetik durumda değişiklik

Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücülerin Sınıflandırılması

Manyeto elastik dönüştürücülerde, dış kuvvetlerin neden olduğu uzunluk veya gerilim değişikliği, manyetik geçirgenliği değiştirme veya tersinebilirlik (histerisiz) döngüsünü bozma etkisine sahiptir. Tablo 3.11'te dış kuvvete göre kuvvet dönüştürücülerin manyetik devre düzenleri ve yükleme şekilleri verilmiştir. Manyetik akının konfigürasyonuna göre 1, 2, 3 boyutlu farklı tipleri ve manyetik devre düzenleri Tablo 3.11'te gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler: elastik elemanlar ve manyetik devreler

Akı konfigürasyonu	1-boyutlu		2-boyutlu		3-boyutlu	
Elastik eleman	A: Çubuk	B: Çerçeve ya da Boru	C: Halka	D: Blok	E: Mebran	F: Şaft
Manyetik devre düzeni						
Mekanik yükleme	Çekme	Basma	Eğilme	Basma	Eğilme	Burulma
Süreç değişkeni_Yer değiştirmesi	Kuvvet	Kuvvet	Kuvvet	Kuvvet Titreşimi	Basma Kuvveti	Tork

Bilinen ve uygulamada kullanılan manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler 6 şekilde sınıflandırılır. Bunlar:

1. Eksenel Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
 - Manyeto Elastik Şeritler ve Çubuklar
 - Manyeto Elastik Amorf Teller
2. Çerçeve Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
3. Boru Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
4. Dairesel Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
5. Blok Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
6. Tork Dönüştürücüleri İçin Manyeto Elastik Şaftlar

olarak sıralanabilir. Bu kuvvet dönüştürücülerin yapısı ve özellikleri aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

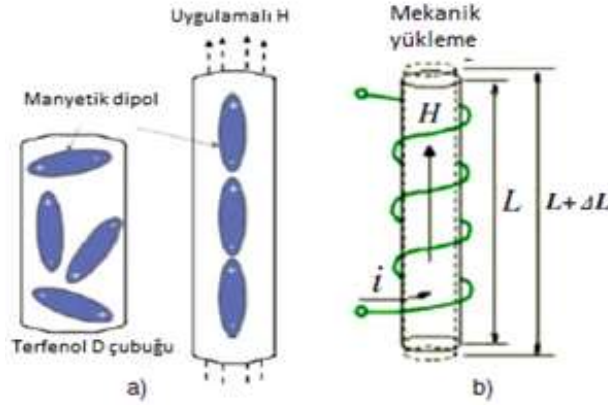
3.4.1. Eksenel Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler

3.4.1.1. Manyeto Elastik Şeritler ve Çubuklar

Manyeto elastik davranış, harici bir manyetik alan uygulandığında ferromanyetik malzemelerde kendiliğinden meydana gelen şekil değişimidir. Bu etki, manyeto elastik aktüatörler ve dönüştürücüler oluşturmak için kullanılmaktadır.

Avusturya'da, Linz, Johannes Kepler Üniversitesi Ölçüm Teknolojisi Enstitüsü'nden araştırmacılar, bilinen en büyük manyeto elastik sabitlerden birine sahip olan nadir toprak elementi olan terbiyum, disprosyum ve demirin toprak elementi olan Terfenol-D'yi kullanarak manyeto elastik kuvvet dönüştürücü hassasiyetini artırma fikri geliştirmişler.

Bir Terfenol-D çubuğu (Şekil 3.37) çift yönlü olarak yüklenebilirken, eksenel bir çekme yüküne maruz kalan yumuşak bir manyetik şerittir.



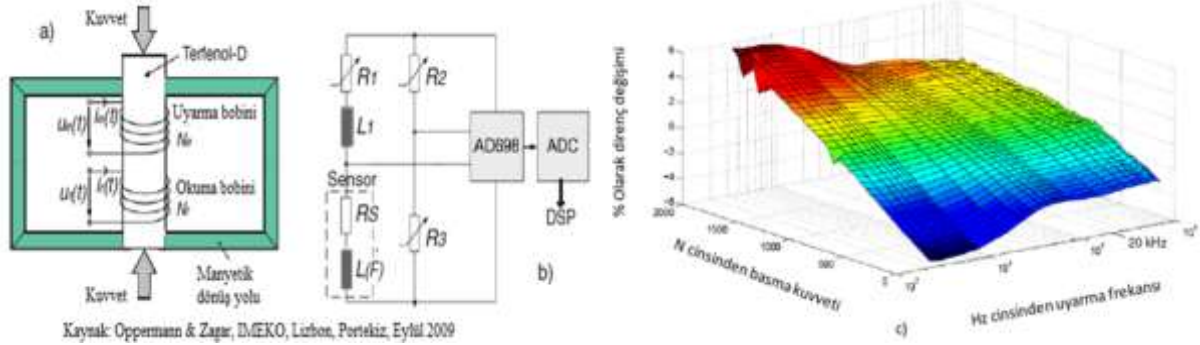
Şekil 3.37. a) Manyetik alandaki dipollerini hizalayan bir Terfenol-D çubuğu b) ve mekanik yük altında

Kuvvet dönüştürücü prototipi (Şekil 3.38a) iki bobin (uyarma ve okuma) içermektedir. Cihazın ana parçası, $d = 13$ mm çapında ve $l = 28$ mm uzunluğunda Terfenol-D çubuktur. Manyetik devreyi kapatmak için düşük girdap akımı kayıplarıyla ferrit malzemenin manyetik bir dönüş yolu uygulanmaktadır. Terfenol-D oldukça kırılğan bir malzeme olduğu için çekme gerilmesiyle kolayca yok edilebilmektedir, bu nedenle sadece basma kuvvetleri uygulanmıştır.

Daha sonra sensör içeren kapalı manyetik devrenin manyetik relüktansını (R_m) belirlemek için tek bir bobin kullanarak sensör düzenlemesinin karmaşıklığını en aza indirilmiştir. Ayrıca R_m , sensör malzemesinin geçirgenliğine bağlıdır ve algılama bobininin kuvvete bağlı endüktansı L (F) ölçülerek belirlenebilmektedir (Şekil 3.38b).

Bu bobin, 20 kHz frekanslı küçük bir uyarma sinyali ile tahrik edilen köprüyü dengelemek için uygun bir empedans (L_1 , R_1) ve iki değişken direnç (R_2 , R_3) ile bir çeyrek AC-köprüsü parçasıdır. Köprü sinyali, doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT) yongası AD698 (Analog Cihazlar)

tarafından demodüle edilmektedir. Bir demodülasyon ve bir analogdan dijitale dönüştürme adımının ardından, sinyal ayrıca bir dijital sinyal işleme biriminde (Blackfin DSP, AD) işlenmektedir. Şekil 3.38c'de manyetik direnç R_m 'nin göreceli değişiklikleri sırasıyla prob yüklemesi ve uyarma akımı frekansı karşısında çizilmiştir.



Şekil 3.38. a) Bir Terfenol-D çubuğuna b) dayalı manyeto elastik kuvvet dönüştürücü, elektronik devrelerin blok diyagramı c) ve mekanik yük (2 kN'ye kadar) ve uyarma frekansı (20 kHz'e kadar) üzerindeki manyetik relüktans bağıl değişiminin 3D bağımlılıkları.

3.4.2. Manyeto Elastik Amorf Teller

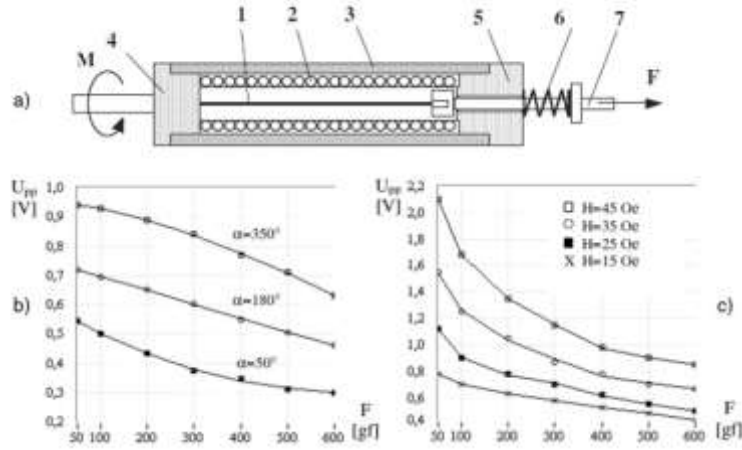
Manyeto elastik etkiler tüm ferromanyetik alaşımlarda meydana gelse de özellikle amorf mıknatıslarda daha belirgindirler. MAW (manyeto elastik amorf teller) iç yapısı, kolay eksenin (bir ferromanyetik malzemede enerjik olarak elverişli spontan manyetizasyon yönüne atıfta bulunulur) tel eksenine paraleldir ve temelde kolay yönlerin radyal olduğu bir dış kabuktan oluşmuştur.

Şekil 5'te bir manyeto elastik amorf telli bir dönüştürücü yapısı görülmektedir. Fe77.5Si7.5B15 bileşimine sahip ve çapı 125 μm olan bir MAW dönüştürücü Unitika Ltd. Japonya tarafından üretilmiştir. Tel (1), manyetik alanı oluşturan uyarıcı bobinin (2) içine aksel olarak monte edilmiştir (Şekil 3.39a). İki kapak (4 ve 5) demir kasayı (3) yanal olarak kapatmaktadır. Kapak (4) bakırdan yapılmıştır ve sensör mili ile dairesel hareket edebilmektedir. Kapak (5) izolasyonlu malzemeden yapılmıştır ve kasa üzerine sabitlenmiştir. Yay (6), telde bir aksel çekme gerilimi yaratılmasına izin vermektedir. Şafta (7) ek bir F kuvveti uygulanabilmekte, böylece kuvvet dönüştürücü olarak kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

Uyarıcı bobin (2), programlanabilir bir AC kaynağı tarafından ayarlanan akımın yoğunluğuna ve frekansına sahiptir. Bu akım, aksel olarak yönlendirilmiş alternatif bir manyetik alana neden olur ve sensör şaftının dönüşü nedeniyle telde indüklenen sarmal anizotropi ile birlikte, çıkış sinyalini oluşturan telin (parça 4 ve 7) uçlarındaki Matteucci voltaj darbelerinin (Tablo 3.10) görüntüsünü belirlemektedir.

Şekil 3.39b, tele uygulanan aksel çekme gerilimine göre çıkış değişimini göstermektedir. En iyi doğrusallık, şaft yarım döndürüldüğünde (180°) elde edilmektedir. Voltaj-kuvvet eğrileri üzerindeki alan yoğunluğu etkisi Şekil 3.39c'de gösterilmektedir. Alan yoğunluğunun yükselmesi doğrusallığı

etkilemektedir. H çok küçükse, sistem kararsız hale gelmektedir. Optimum, 15 ila 25 Oe (Oersted, santimetre-gram-saniye birim sistemindeki yardımcı manyetik alan H 'nin birimidir.) aralığında bulunmuştur.

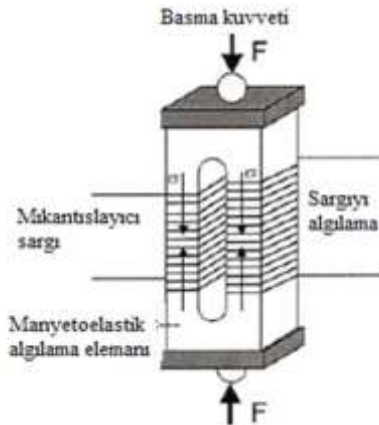


Şekil 3.39. (a) Manyeto elastik amorf tel dönüştürücü (b) şaft açısını değiştirdiğinde eksenel kuvvete çıkış sinyali bağımlılığı (c) veya manyetik alan yoğunluğu.

2. Çerçeve Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler

Ferritler gibi yığın manyetik malzemelerden yapılmış algılama elemanlarının olması durumunda çerçeve şeklindeki çekirdek yöntemi kullanılabilir. Şekil 3.40'da verilen model, kapalı manyetik devreyi sağlamak ve 60 MPa'ya kadar olan aralıkta basma kuvvetini karşılamaktadır. Çerçeve şeklindeki göbek üzerinde hem mıknatıslama hem de sensör sarımı yapılmıştır. Bu sargılar, basma gerilmelerinin (σ) etkisi altında manyetik histeresiz döngüsü B (H) değişikliklerinin ölçülmesini sağlamaktadır.

Manyetik geçirgenlik değişimi $\Delta\mu$, manyeto elastik hassasiyetin ana faktörüdür ve manyeto elastik işleyiş sırasında birim şekil değişimi ϵ değişimi ile güçlü bir şekilde bağlantılıdır:



$$S_m = \frac{\Delta L / L}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \mu / \mu}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \mu / \mu}{\epsilon}$$

Şekil 3.40. Ferritten yapılmış çerçeve şeklindeki manyeto elastik dönüştürücünün yapısı

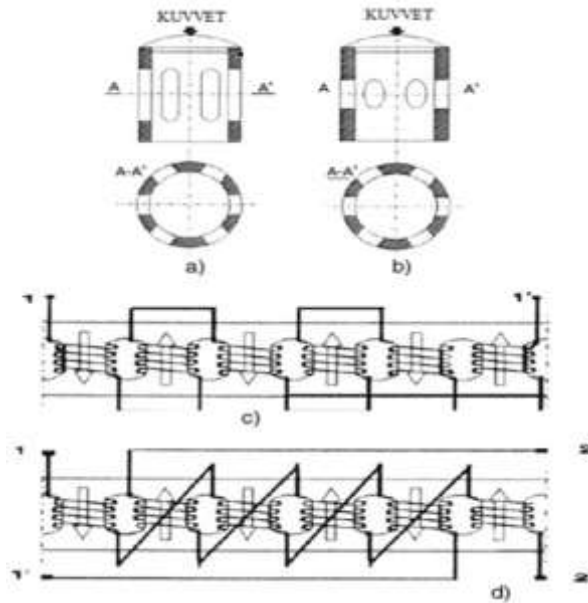
3.4.3. Boru Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüleri

Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler, daha yüksek histeresiz ve belirsizliklerinden dolayı dirençli uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüleri kadar yaygın değildir. Basit ve ucuz birincil elektroniklerin kullanımını kolaylaştıran yüksek ve güçlü bir çıkış sinyali, yüksek kabul edilebilir mekanik aşırı yük ve uygun sıcaklık özellikleri gibi birçok avantaja sahiptirler.

Sağlam yapıları, yüksek sinyal seviyeleri ve küçük iç dirençleri nedeniyle manyeto elastik yük hücreleri, haddehaneler gibi zorlu ve elektriksel olarak bozulmuş ortamlarda kullanılabilir.

Manyeto elastik kuvvet dönüştürücülerin çekirdeklerindeki iki malzeme ortak olarak kullanılmaktadır, elektroteknik çelik ve kalıcı manyetik alaşım. Kayıpları önlemek için büyük ölçekte ince levhalar halinde üretilmektedir. Ayrıca büyük çekirdek yapısında, dönüştürücünün tüm gerilmeye maruz kalan parçaları boyunca eşit kuvvet dağılımı elde etmek daha kolaydır. Bu iki sorunu aşabilmek için ya tabakaları birbirine yapıştırarak ya da karmaşık dönüştürücü yapıları tasarlayarak çözülmektedir (Şekil 3.41).

Dönüştürücünün tüm aktif parçaları arasında eşit kuvvet dağılımı Canthal tipi FeNiAl alaşımlarından yapılmış ve dikdörtgen yuvalara (Şekil 3.41a) veya dairesel deliklere (Şekil 3.41b) sahip boru şeklindeki elasto manyetik elemanlarla elde edilmiştir.



Şekil 3.41. a) Sütunlu sargı b) delik şeklinde c) bobin tipi olarak bağlanan boru şeklindeki elemanlar (d) transformatör tipi olarak manyeto elastik kuvvet dönüştürücü

Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüleri, ölçülen kuvvet oluşturduğu gerilme elemanlarının manyetik akı tarafından tamamen nüfuz edeceği şekilde imal edilmelidir. Akının nüfuzuna göre girdap akımları ile sınırlıdır:

$$d_p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu \cdot f_f}}$$

Burada, d_p , penetrasyon derinliği, ρ - direnç, μ - manyetik çekirdek malzemesinin geçirgenliği ve f_f - alan frekansıdır. 500 Hz'lik bir alan frekansı için penetrasyon derinliği d_p yaklaşık 1.8 mm'ye kadar uzanmaktadır.

Boru şeklinde kuvvet dönüştürücü çalışmasının temel fikri, mekanik gerilme nedeniyle çekirdeğin manyetik özelliklerinin değişmesine bağlıdır. Tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlar olarak, sütun şeklindeki dönüştürücülerde akı yoğunluğu yönü, özellikle kolonlar gibi en gerilimli kısımlarda gerilim yönü ile çakışması önemlidir. Delik şekilli dönüştürücülerde ise, akı yoğunluğunun vektörü, akı yolu boyunca değerini değiştirmekte ve yönü, mekanik gerilimin yönü ile çakışmamaktadır. Dolayısıyla delik şekilli manyeto-elastik kuvvet dönüştürücü modelinin nispeten hassasiyeti daha düşüktür.

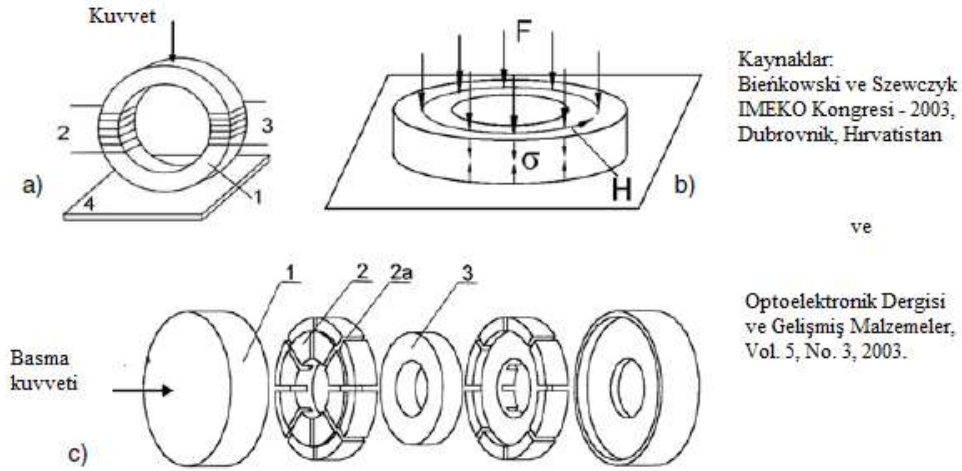
Bu sütunlu ve delik şeklindeki boru dönüştürücüler, içten çekmeli sarımlar gerektiren iki konfigürasyon için kullanılabilmektedir. Bunlardan birincisi bobin empedansının çekirdek malzemedeki gerilime bağlı olduğu boğucu tipi (choke-type) dönüştürücü (Şekil 3.41c), Bobinin akımı veya voltajı, dönüştürücü çıktı miktarı olarak değerlendirilebilmektedir. İkincisi ise çapraz endüktansın bulunduğu transformatör tipi dönüştürücü (Şekil 3.41d), ölçülen kuvvetin neden olduğu değişiklik, ikincil bobinin çıkış voltajındaki bir değişikliği belirlemektedir. Bu ikincil voltaj, manyeto elastik kuvvet dönüştürücünün çıkış sinyalini oluşturmaktadır.

3.4.4. Dairesel Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüleri

Dairesel bir halka, elips şeklinde deforme edildiğinde hem basma hem de çekme gerilmeleri meydana gelmektedir (Şekil 3.42a). Bu sebepten dikey halkanın manyeto elastik hassasiyeti önemli ölçüde azalmakta ve manyetik özelliklere dayalı kuvvet dönüştürücüler için önerilmemektedir.

Yatay çekirdek yönteminde (Şekil 3.42b) basma kuvveti F halka şeklindeki algılama elemanına H mıknatıslama alanına dik olarak uygulanır. Böylece algılama elemanının manyetik devresinin tüm uzunluğu üzerinde tek basma gerilimine (σ) ulaşılabilir. Dolayısıyla ticari olarak temin edilebilen halka şeklindeki çekirdekler, manyeto elastik kuvvet ve/veya gerilim dönüştürücüleri olarak kullanılabilir.

Şekil 3.42c'de halka çekirdeğe gerilim uygulamak için özel bir cihaz gösterilmektedir. Taban arkalıkları (1), bir halka çekirdeğin (3) basma kuvvetine F maruz kalmasına izin vermektedir. Özel, manyetik olmayan silindirik arkalık (2) nedeniyle, çekirdekteki gerilimlerin dağılımı tek tiptir. Ölçme ve mıknatıslama sargıları, silindirik arkalıklardaki (2) oluklara (2a) yerleştirilmektedir.

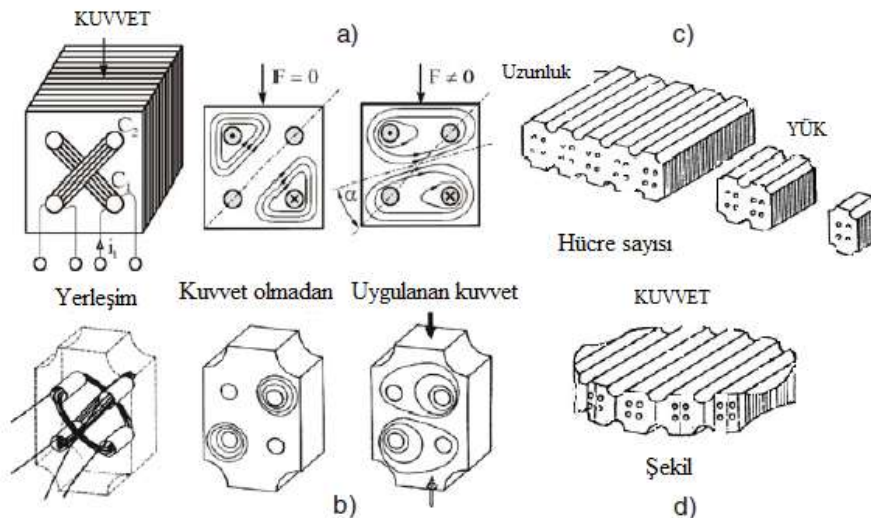


Şekil 3.42. a) Sıkıştırma kuvvetini halka şeklindeki algılama elemanının çapı yönünde uygulama şekli: 1 - algılama çekirdeği, 2 - mıknatıslama sargısı, 3 - algılama sargısı, 4 - taban düzlemi. b) Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüleri için uygulanan yatay halka şeklindeki çekirdek şekli, c) Halka şeklindeki bir algılama elemanına basma gerilimi uygulamak için cihaz şekli

3.4.5. Blok Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüleri

Bu kategoriye giren dönüştürücü sistemleri “basınçlandırma cihazları” olarak bilinmektedir. Bu durumda yararlanılan etki, manyetik olarak izotropik bir malzemenin gerildiğinde farklı bir boylamasına ve yük eksenine çapraz olarak modifiye edilmekte, yani manyetik olarak anizotropik hale gelmektedir.

Pozitif manyeto elastik etkiye sahip malzemelerin maruz kaldığı basma gerilmesi, yük yönünde geçirgenlik azalmakta ve ona dik açılarda artmaktadır. Bu, orijinal olarak simetrik akı çizgisi modelinin bir modifikasyonu olarak görülebilir (Şekil 3.43a). Bu değişiklik, karşılıklı olarak 90° dengelenmiş birincil (C1) ve ikincil (C2) bobinler tarafından alınabilir.



Şekil 3.43. a) Platin tarafından levhalarla gösterilen manyeto elastik prensip şekli b) Wieringa tarafından kalın çekirdek yapısı c) Manyeto elastik kuvvet dönüştürücülerin kapasitesini uzunluk ve hücre sayısına göre ayarlamak için kombine yöntemler d) şekline göre.

Şekil 3.43b'de görüldüğü gibi ferromanyetik çelikten yapılmış bir blokta, bir karenin köşelerinde dört delik açılmıştır. Bu deliklere çapraz olarak iki bobin yerleştirilmiştir. Bobinlerden biri alternatif akımla beslenmektedir. İki bobin birbirine dik olduğu için ikinci bobinde gerilim indüklenmeyecek ve bu nedenle ikinci bobinden manyetik hat geçmemektedir. Çelik blok yüklenirse, deformasyon nedeniyle bobinler artık birbirine dik değildir ve ayrıca iki dikey yöndeki manyetik özellikler değişmektedir. Bazı manyetik hatlar ikinci bobinden geçerek içinde bir voltaj oluşturacaktır. İkinci bobinden geçen manyetik akı, uygulanan kuvvet ile orantılıdır.

Şekil 3.43c'de verilen prensip İsveç'teki ASEA Şirketi tarafından getirilmiştir. Uzun çelik bloklar ("seri kombinasyon" olarak adlandırılır) ve/veya "paralel" birkaç blok kullanılarak manyeto elastik kuvvet dönüştürücünün nominal kapasitesi ayarlanabilmekte veya büyütülebilmektedir. Bu dönüştürücünün avantajı basit, sağlam ve küçük bir yüksekliğe sahip olmasıdır. Kare veya dairesel yüzey üzerindeki kuvvet birbiri ile ilişkili olduğundan kuvvetin algılama cihazına nasıl dağıtıldığı önemli değildir (Şekil 3.43d).

3.4.6. Tork Dönüştürücüleri İçin Manyeto Elastik Şaftlar

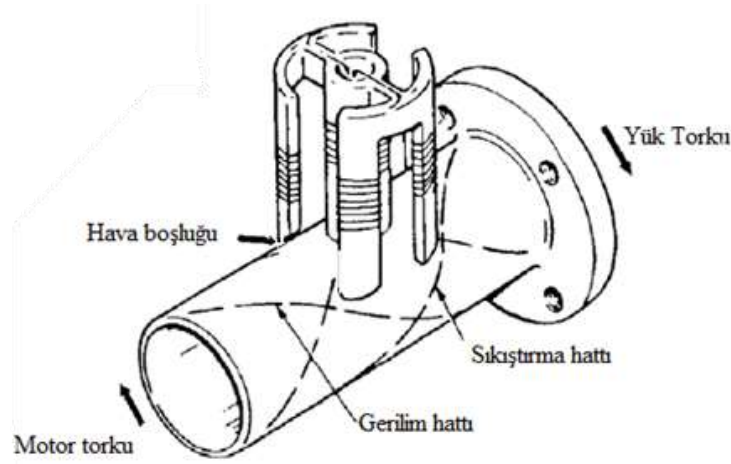
Bir (manyeto elastik) şafttaki gerilim, örnek olarak uygulanan tork ile orantılıdır.

$$\tau = \frac{M_t \cdot r}{I_p} \quad (26)$$

τ şaft yüzeyindeki maksimum kesme gerilimi, M_t burulma momenti, r şaft yarıçapı ve I_p polar atalet momentidir. Bunu takiben çelik gibi manyetik bir malzemeden yapılmışsa torkun, şaftın geçirgenliğini değiştirmesi gerekmektedir.

Şekil 3.44'de gösterilen tork dönüştürücü beş bobinden oluşan ortak bir beş kollu çekirdeğe sarılmaktadır. Merkezi bobin, bir transformatörün birincil sargısı (primer) olarak düşünülebilmekte ve çevresel olarak konumlandırılmış dört bobin, trafo ikincil sargıları (sekonderleri) olarak işlev görmektedir. Primer ve sekonderler arasındaki manyetik bağlantı, dönüştürücüye yakın konumlandırılmış çelik mil tarafından sağlanmaktadır. Birincil bobin, alternatif bir akımla uyarılmakta ve şaft içinde salınan bir manyetik alan oluşturmaktadır. Dört ikincil bobin, bir Wheatstone köprüsü düzenlemesinde birbirine bağlanmakta ve tork yani burulma halindeki bir silindir için 45°'de sarmal bir yol izleyen ana gerilim hatları üzerinde uzanacak şekilde konumlandırılmaktadır.

Mil burulma altında olmadığına, dört sekonder de eşit akımlar olması nedeniyle voltajı sıfırdır. Şafta tork uygulandığında, çekme ve basma yönlerindeki geçirgenlikler eşit ancak zıt miktarlarda değişecek ve ortaya çıkan köprü çıkış voltajının genliği uygulanan tork ile orantılı olacaktır.



Şekil 3.44. Manyeto elastik tork dönüştürücü.

Bu tür bir tork dönüştürücü ile ilgili temel sorunlar şunlardır:

- şaft malzemesinin homojen olmaması (şaft çevresinde geçirgenlik % 50'ye kadar değişebilir),
- sensör mili boşluğundaki değişikliklere duyarlılık,
- kalıcı değişikliklere neden olan aşırı gerilme ve yaşlanma,
- şaft dönüş hızındaki değişiklikler nedeniyle dönüştürücü çıkışındaki değişiklikler,
- Sabit bir tork için çıkış sinyali, dönüş hızına eşdeğer bir frekansta "dalgalanabilir" ve anlık torku ölçmek zor olabilir.

Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücülerin Kullanım Alanları

Piyasada bulunan manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler 2 kN - 50 MN aralığında yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Bu geniş aralıklarından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlar; ekstradde köprüler, zemin ankrajları, kazıklı duvarlar, setler, kirişler ve plakalar gibi çelik yapılarda temassız mekanik gerilim ölçümü için kullanılırlar.

Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüleri birçok farklı ülkede ve birçok farklı yapıda kullanılmaktadır. En önemli uygulamaları Şekil 3.45'de gösterildiği gibi; Kanada'daki BC Place Stadyumu'nun açılır kapanır çatısının askılarındaki gerginliğin sürekli olarak izlenmesinde, Třinec-Baliny veya statik yük testi sırasında Chotěbuz'daki köprünün ilave öngerilmeli takviyesindeki gerilimin izlenmesinde ve Mělník limanındaki taşkın kontrol barajının yapımında gerilim ölçümünde kullanılmaktadır.



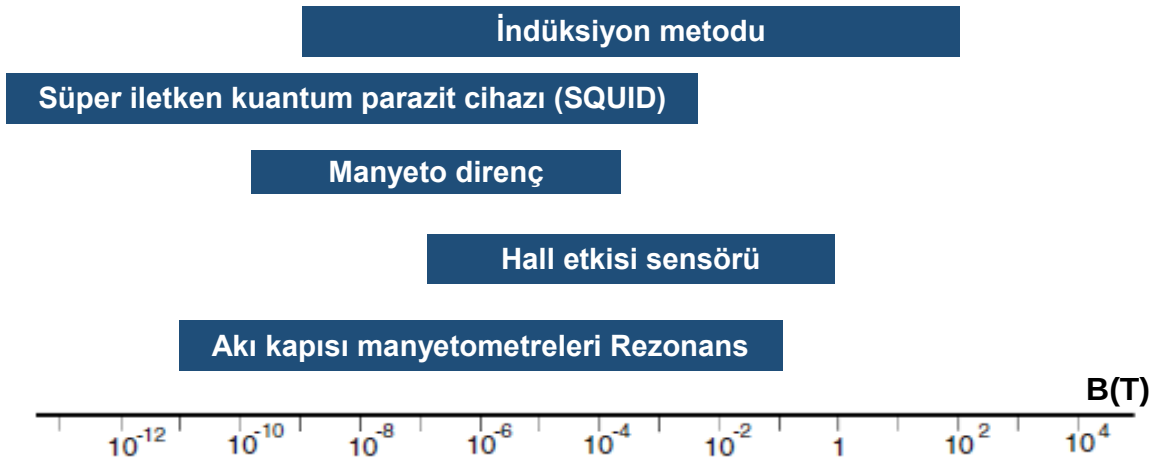
Şekil 3.45. Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüleri çeşitli kullanım alanları

3.5. Elektro Manyetik Kuvvet Ölçme Cihazları

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, elektro manyetik kuvvet dönüştürücü (ölçme cihazı) sistemlerini de etkisi altına alarak uygulamaları ve cihaz türlerini etkilemiştir. Bu bölümde temel elektro manyetik kuvvet dönüştürücülerin yapısı ve farklı cihaz tipleri ele alınmıştır.

Çalışma Prensibi

Manyetik alanların ölçümü, eskiden beri kullanılan pusula cihazlarından başlayan yön bulma sistemlerini geliştirmek ve hassaslığı arttırmak için modern elektronik sistemlerle uyumlu halde geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Manyetik alan büyüklük değerine göre farklı manyetik alan ölçüm teknikleri Şekil 3.46'da gösterilmiştir. 5 farklı ölçüm metodu ve bunların kullanıldığı manyetik akı ölçüm aralıkları görülmektedir.



Şekil 3.46. Manyetik akı büyüklük değerine göre farklı manyetik alan ölçüm teknikleri gösterimi.

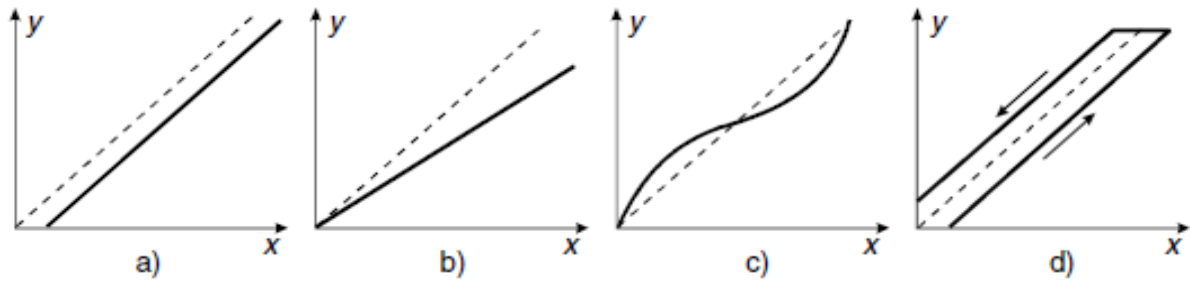
Tablo 3.12'de çeşitli ölçüler için manyetik sensör prensiplerinin özeti olarak; proses değişkeni, AC (alternatif akım) veya DC (doğru akım) seçeneği, temel ve fonksiyonel prensip ve manyetik karakteristik belirleyici özelliklerine göre manyetik sensörler verilmiştir.

Manyetik sensörler, elektro manyetik alanın prensiplerine ve etkilerine göre çalışırlar ve bir şekilde veya başka bir şekilde temel fonksiyonel elemanı olarak manyetik malzeme içerirler. Tablo 3.12'deki ölçüm prensipleri kuvvet dönüştürücüleri için kullanılmaktadır. Bir bobin sistemi (taslak B), elastomanyetik veya manyetostriktif (taslak C), DC alan manyetik ön besleme (taslak D) ve galvanomagnetik olanlarda (endeks A) veya akı dağılımındaki değişiklikler (çizimler F ve G) gösterilmiştir.

Tablo 3.12. Çeşitli ölçüler için manyetik sensör prensiplerinin özeti tablosu

Proses değişkeni	Yer değişimi (X)		Kuvvet (F)	DC Manyetik Alan (H_0)	Hız (n)	Akım (I)
1.) AC/DC	AC	AC	AC	AC	DC	DC
2.) Temel ve Fonksiyonel prensipler	Endüktance Değişimi ↓ Diferansiyel Voltaj	Akım dağılımındaki değişim ↓ Diferansiyel Voltaj	Elastik gerilme ↓ Geçirgenlik değişimi	DC Manyetik Alan Önbeslemesi ↓ Harmoniklerin Oluşumu	Galvanomanyetik Etki ↓ Hall Voltajı	Galvanomanyetik Etki ↓ Hall Voltajı
3.) Şematik resim						
4.) Manyetik karakteristik belirleyici özellik	 Geçirgenlik Doygunluğu	 Geçirgenlik Doygunluğu	 Manyeto striksiyon Elastik Sınırı	 Anlık ve maksimum geçirgenlik	 Zorlayıcı alan kuvveti manyetiklik giderme eğrisi	 Dönüş yolunun geçirgenlik direnci

Şekil 3.47'de tipik kuvvet ölçüm sensörleri için hataları grafik halde verilmiştir. Bu hatalar doğrusallık, hassasiyet, tersinebilirlik (histerisiz), sapma hataları sayılabilir. Bu hatalara göre en iyi sensörü belirlemek amacıyla Tablo 3.12 kullanılabilir. Tablo 3.12'den en iyi ölçüm sistemini seçmek için, B (manyetik akı) ve H (manyetik alan yoğunluğu) diyagramlarının doğrusal olması, başlangıç noktasına kesişmesi veya yaklaşması, çift yönlü olması ve düşük histerisize sahip olması önerilir. Bu bakımdan elektro manyetik ölçüm için optimum uygun kuvvet ölçme cihazları ile bağlantılı prensipler G (Hall sensörleri) - D (DC alan manyetik sapması) - A veya B (değişken endüktans, örneğin doğrusal değişken diferansiyel transformatör) - C (manyeto elastik / manyetostriktif).



Şekil 3.47. Kuvvet ölçüm cihazlarındaki ölçüm hataları: a) sapma (katkı maddesi), b) hassasiyet (çarpımsal), c) doğrusallık, d) tersinebilirlik (histerisiz) (noktalı çizgi - ideal durum, sürekli çizgi - gerçek durum).

Elektro Manyetik Kuvvet Dönüştürücü Tipleri

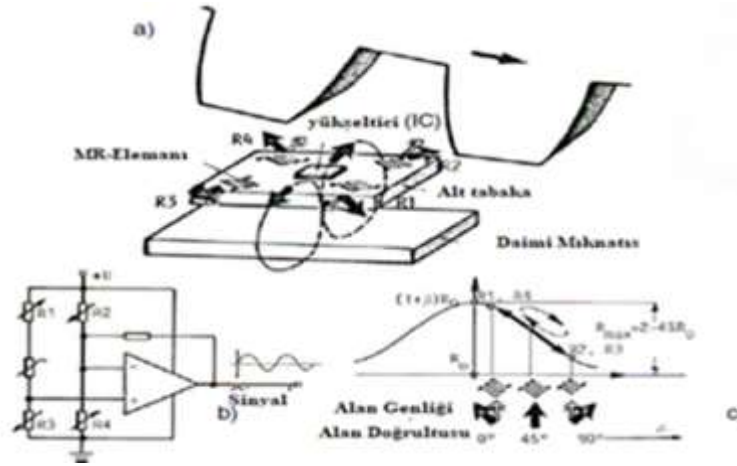
Elektro manyetik kuvvet dönüştürücü bilinen tiplerinden 3 tanedir. Aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Manyeto Direnç Kuvvet Dönüştürücüler
2. Manyetik Alanda Dirençli Kuvvet Dönüştürücüler
3. Manyetik Alanda Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Bu dönüştürücü tipleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.5.1. Manyeto Direnç Kuvvet Dönüştürücüler

Bu dönüştürücüler, metallerin düşük sıcaklıkta, bir manyetik alana maruz kaldıklarında gösterdikleri direnç değişikliğinin ölçüm prensibine göre çalışırlar. Prensip şekli Şekil 3.48'te verilmiştir.



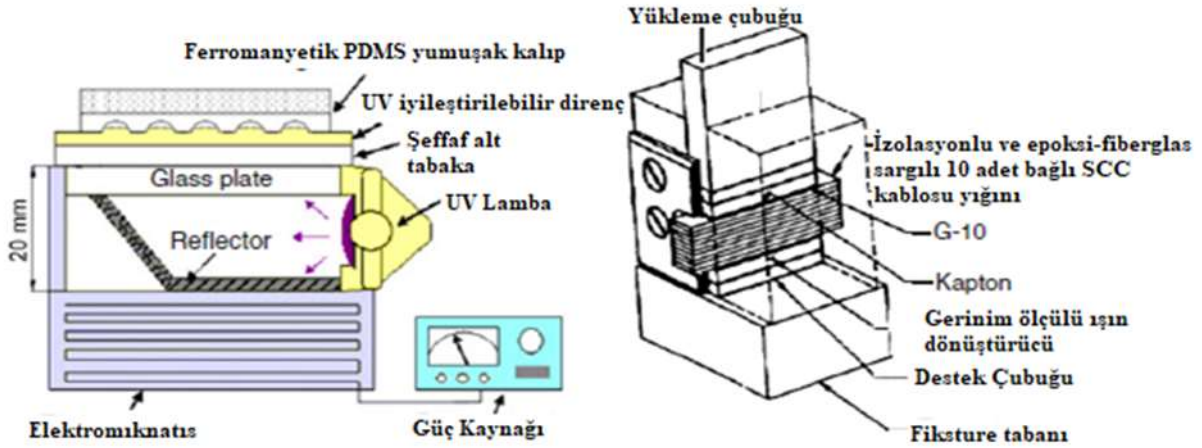
Şekil 3.48. Dönme hızı ve gücünü ölçmek için manyeto direnç sensörü: a) Manyeto dirençlerin konumlandırılması, b) Wheatstone köprüsü bağlantısı ve ölçüm şeması, c) Çıkış sinyali diyagramı

Endüstriyel bir uygulamada, dönme hızını (ve sonuçtaki gücü) ölçmek için manyeto dirençli dönüştürücüler kullanılabilir. Manyeto direnç etkisi, yarı iletken malzemedeki elektron hareketliliğine bağlıdır.

Bugüne kadar manyetik alan sensörleri için GMR (giant magnetoresistance) malzemelerinin en iyi şekilde kullanımı Wheatstone köprüsü biçiminde olmuştur, ancak basit GMR dirençleri ve GMR yarım köprüleri de üretilebilir. Bir GMR köprü dönüştürücüsünün hassasiyeti, akı yoğunlaştırıcılarının uzunlukları ve aralarındaki boşluk değiştirilerek tasarımda ayarlanabilir. Bu şekilde, yaklaşık 300 Oe'de (Oe manyetik enerji birimidir.) doymuş bir GMR materyali, 15, 50 ve 100 Oe'de doymuş farklı sensörler oluşturmak için kullanılabilir. Harici bobinler ve geri besleme, 100 mA / m aralığında daha yüksek hassasiyete sahip manyeto dirençli dönüştürücüler üretmek için kullanılabilir. Genel olarak, bu dirençlerde % 10'luk bir değişiklik için köprü çıkışı, köprüye uygulanan voltajın yaklaşık % 5'idir.

3.5.2. Manyetik Alanda Dirençli Kuvvet Dönüştürücüler

Kuvvete karşı lineer direnç çıkışı üreten bir dönüştürücüdür. Aslında, kontrollü bir sabit mıknatıslı alandaki şaft, hareket ettirildiğinde direnci değişen bir yarı iletken çipten meydana gelir. Direnç çıkışı doğrudan bir ohm metre veya dijital multimetre üzerinde okunabilir ve kuvvete dönüştürülebilir.



Şekil 3.49. Elektro manyetik kuvvet destekli baskı ekipmanının şematik fonksiyonel diyagramı

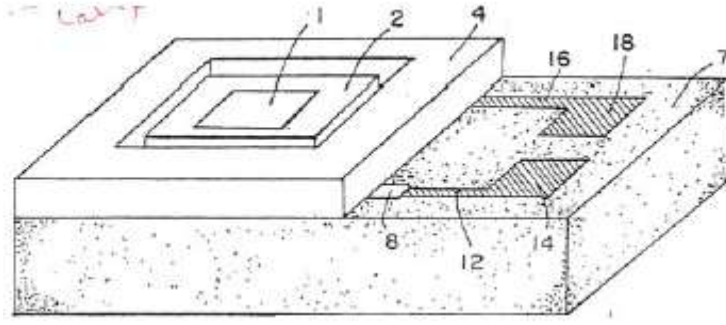
Şekil 3.50. Süper iletken hızlandırıcı mıknatısta iç kuvvetleri ölçmek için gerinim ölçer konsol

Şekil 3.49, bir UV geçirgen üst levha (cam levha), baskılı bir alt tabaka, bir UV lambası ve bir güç kaynağı olan bir elektromıknatısdan oluşan elektro manyetik kuvvet destekli UV baskı sistemini göstermektedir. 633 nm dalga boyunda kırılma indisi 1.52 olan UV ile kürlenene bir reçine Ormocomp (Micro Resist Technology GmbH) kullanılır. Elektromıknatısın akımı ve baskı kuvveti bir güç kaynağı tarafından kontrol edilir. UV lambanın dalga boyu 365 nm ile 410 nm arasında iken 365 nm'de yoğunluk $100 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 'dir.

Kalibrasyonlar, Şekil 3.50'de gösterilen fikstürde, ortam sıcaklığında bir çift gerinim ölçülü giriş üzerinde gerçekleştirilir. Bilinen bir toplam yük, 10 katmanlı kablo tipi süper iletken istifine bir pres veya başka tipte bir yükleme makinesi ile uygulanır.

3.5.3. Manyetik Alanda Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Kondansatörler yapıları gereği olarak elektrik yükünü depolar. Kondansatörlerin yük depolama kapasiteleri ise kondansatör plakalarının boylarına, bu plaklar arasındaki mesafe uzaklığına ve iki plaka arasındaki yalıtkan malzemenin özelliğine bağlıdır. Sonuç olarak, kondansatör plakaları birbirine yaklaştırılıp uzaklaştırılırsa, esnetilirse veya iki plaka arasındaki dielektrik malzeme hareket ettirilirse, kondansatörün kapasitesi değişir. Kondansatörün kapasitesiyle birlikte alternatif akıma gösterdiği direnç de değişir. Bu prensipten hareket ile kapasitif kuvvet sensörü imalatı yapılır.



Şekil 3.51. Katı hal manyetik sensörü ile kapasitif kuvvet algılama

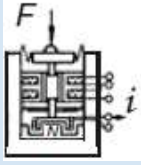
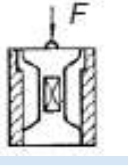
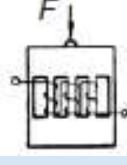
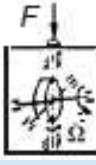
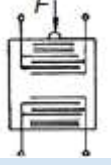
Dünya'nın manyetik alanı veya diğer orijinli bir manyetik alanı, silikon platform üzerine yerleştirilen manyetik malzemeye karşı çekici veya itici bir güç olarak hareket eder. Manyetik kuvvet, kapasitans değerindeki bir değişikliği elektrik sinyaline çeviren silikon platformu ve diyafram zarını mekanik olarak değişkenliğinin ölçülmesi ile elde edilir.

Elektro Manyetik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kullanım Alanları

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücülerin küçük kuvvet ölçümleri alanında çok fazla kullanım alanı mevcuttur. Elektro manyetik kuvvet dönüştürücüler 1 N ile 10^{-12} N aralığında ölçüm yapabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde düşük kuvvet ölçüm aralıklarında yaygın olarak kullanılırlar.

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücülerin kullanım alanları oldukça geniştir. Aşağıda Tablo 3.13'de verilen kriterlerle elektro manyetik kuvvet dönüştürücüler ile farklı prensipli kuvvet dönüştürücüler karşılaştırılmıştır. Tablodan görüldüğü gibi elektro manyetik kuvvet dönüştürücüler en düşük doğrusallık hatasına sahiptirler. Ayrıca çökme miktarlarının 0 (sıfır) olması da bir avantajdır. Bu avantajları ile pek çok kullanım alanları vardır. Ancak $< 1 \text{ kg}$ ölçüm aralığında kullanılması ise hem avantaj hemde dezavantajı olarak görülmektedir.

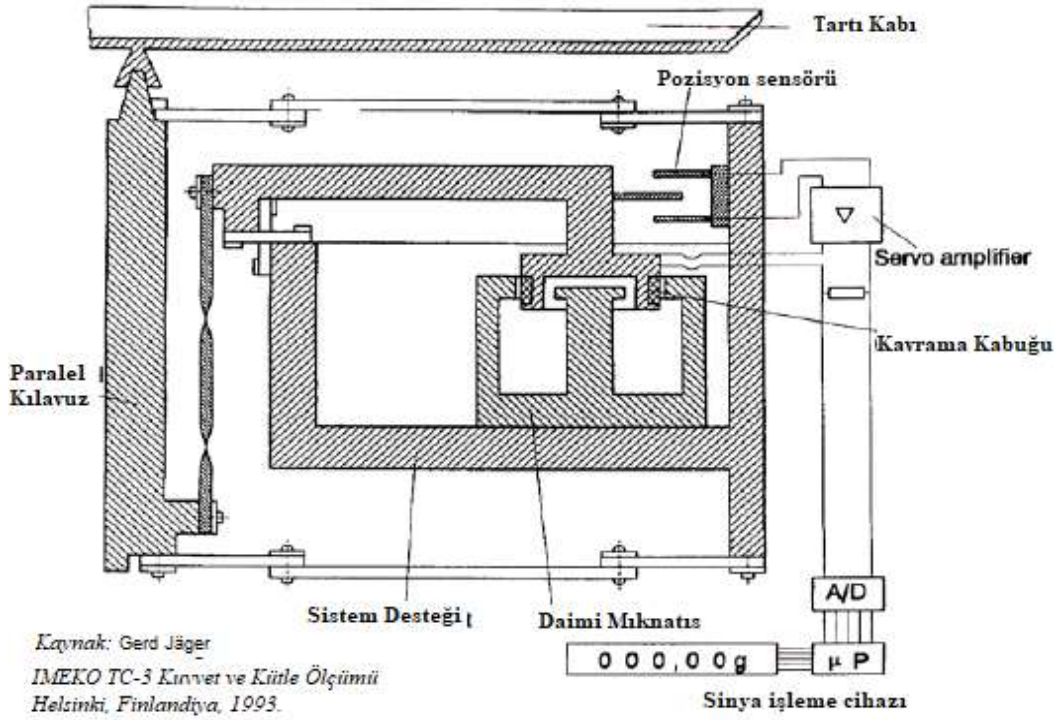
Tablo.3.13 Farklı kuvvet dönüştürücülerin özelliklerinin karşılaştırılması tablosu

Kriter	Elektromanyetik Kuvvet Dönüştürücü	Dirençli Uzama Ölçerli Kuvvet Dönüştürücü	Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücü	Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları	Akustik Kuvvet Ölçme Cihazları
Sembolik düzen					
Fiziksel formül	$i \sim F$	$\frac{\Delta R}{R} \sim \epsilon \sim F$	$\mu \sim F$	$n \sim \epsilon$	$f \sim f_0(1 - \epsilon)$
Kuvvet aralığı	< 1 kg	0.1 ⇔ 1000t	0.1 ⇔ 1000t	< 10 kg	< 10 kg
Çökme miktarı [mm]	0	< 0.5	< 0.5	< 0.1	< 0.2
Doğrusallık Hatası	< 0.01 %	< 0.02 – 1 %	> 1 %	< 0.02 %	> 0.1 %
Termostabilite	10	15	30	1	-

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücüleri, elektro manyetik tartım işlemlerinde ve mikro (10^{-6}), nano (10^{-9}), piko (10^{-12}) gibi küçük kuvvetlerin ölçülmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanım alanlarına göre örnek cihaz yapıları aşağıda verilmiştir.

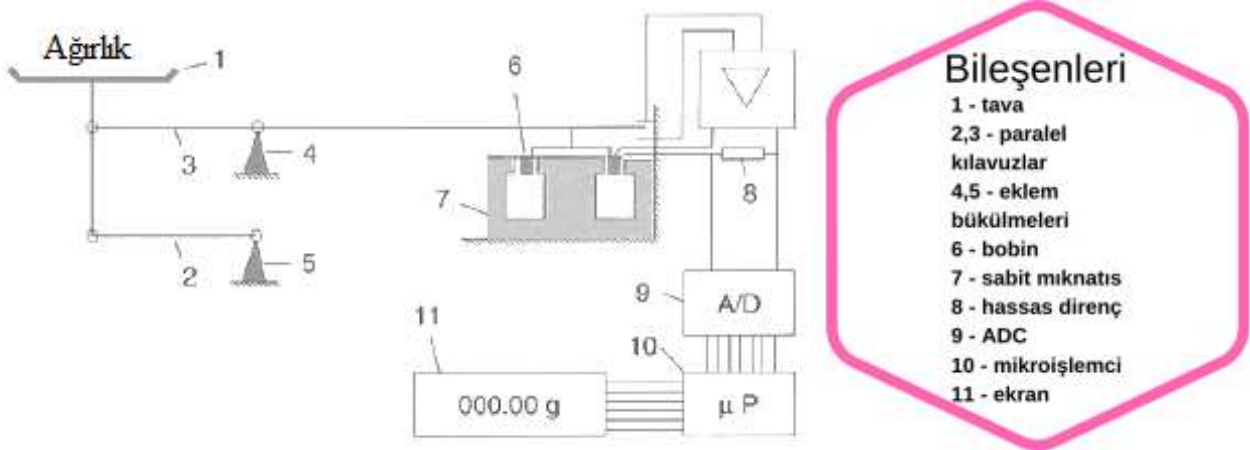
Manyetik Kompanzasyon Terazisi

EMFC elektro manyetik kuvvet kompanzasyonunun klasik kısaltmasıdır: Servo kontrollü terazi sistemlerinde uygulanan kuvvet elektro manyetik olarak dengelenir. Kuvvet değişiminden kaynaklanan yükleme noktasının yer değiştirmesi elektriksel olarak ölçülür ve ortaya çıkan sinyal elektromıknatısa (kalıcı bir mıknatısla ilişkili bir elektrik bobini) geri beslenir. Dijital olarak işlenen ve mühendislik birimlerinde görüntülenen kompanzasyon için gereken akım uygulanan yükün bir ölçüsüdür (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. Manyetik kompanzasyonlu terazisinin iç yapısı

Bu kuvvet geri beslemeli tartım cihazı, algılamayı aktüvatör ile birleştiren tam bir ölçüm sistemidir. Uygulanan kuvvet, aktüvatör bobininden geçen akım ile doğru orantılıdır ve bilinen bir kütle m'yi dengelemek için gerekli akımı bularak kalibrasyonu da mümkündür (veya kuvvet $F = m \times g$).



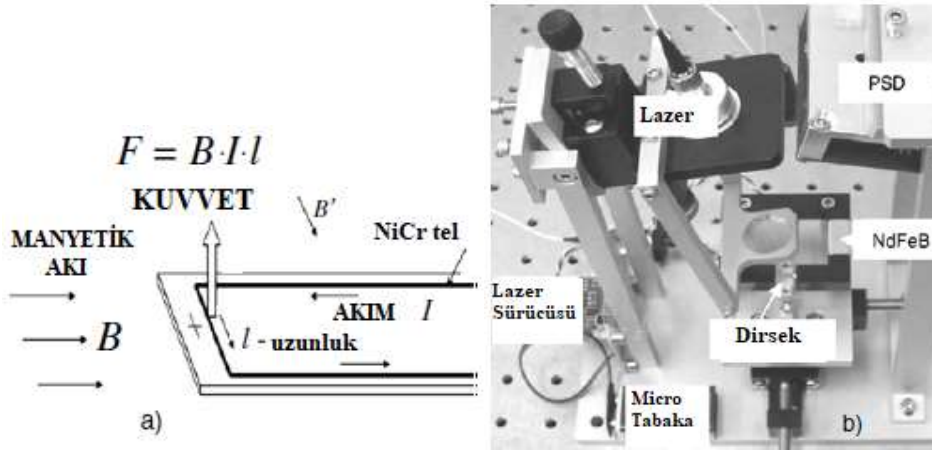
Şekil 3.53. Elektro manyetik kuvvet dengeleme tartım hücrelerinin çalışma prensibi

Paralel kılavuzların (2, 3) işlevi, bir numune tartım kefesini (1) üzerinde merkezden uzaklaştırıldığında üretilen ek torku durdurmaktır (Şekil 3.53). Sistemin tüm hareketli parçaları, esneklik ve sertlik arasında mükemmel bir uzlaşmalı olan sağlam eklemlerine (4, 5) dayanır. Bir kütlenin uyguladığı kuvvet yani tartılan numune, içinden akımın geçtiği bir bobinin (6) manyetik kuvveti ile karşılanır.

Bu bobin, ikinci tavayı ağırlıklarla veya geleneksel terazideki anahtarlama ağırlıklarıyla değiştirerek kalıcı bir mıknatıs (7) boşluğunda bulunur. Kontrol döngüsüne entegre edilen hassas bir direnç (8), akımı, tava üzerindeki yüklerle orantılı bir gerilime dönüştürür. Bu sinyal analog-dijital dönüştürücüye (9) iletilir, daha sonra filtrelenir ve mikroişlemci (10) tarafından dijital olarak analiz edilir ve bir ekranda (11) gösterilir.

Mikro ve Nano Kuvvet Ölçümleri

Ulusal metroloji enstitüleri, EMFC prensibine dayanan elektrostatik kuvvet dengelerini ve transfer standartlarını kullanarak nano kuvvet standartları geliştirmekte ve kullanmaktadır. Boş denge ile aktif ölçüm yöntemi daha doğru ve hassastır.



Şekil 3.54. Düzgün manyetik akı (a) altında Lorentz kuvveti ve elektro manyetik prob deformasyonu (b) tespit etmek için optik cihazlar tarafından tahrik edilen yüksek hassasiyetli konsol

Sistem, muntazam manyetik akı üretimi için kalıcı mıknatıslara ve konsol deformasyonlarını tespit etmek için optik cihazlara sahiptir (Şekil 3.54 b). Bir lazer diyot ve bir PSD içeren bir lazer ışını saptırma sistemi, elektro manyetik aktif probun deformasyonunu tespit eder. Hassas bir şekilde ölçmek için mikro / nano kuvvetler, konsol boş pozisyonu dikey giriş kuvvetine karşı Lorentz kuvveti ile kontrol edilir. Bu prob, mikro kuvvet değerlendirmesi için bir transfer standardı olarak veya moleküller arasındaki bağlayıcı kuvvet ölçümü, kuvvet litografisi ve nano indentasyon (nano sertlik) gibi çeşitli araştırmalarda kullanılmaktadır.

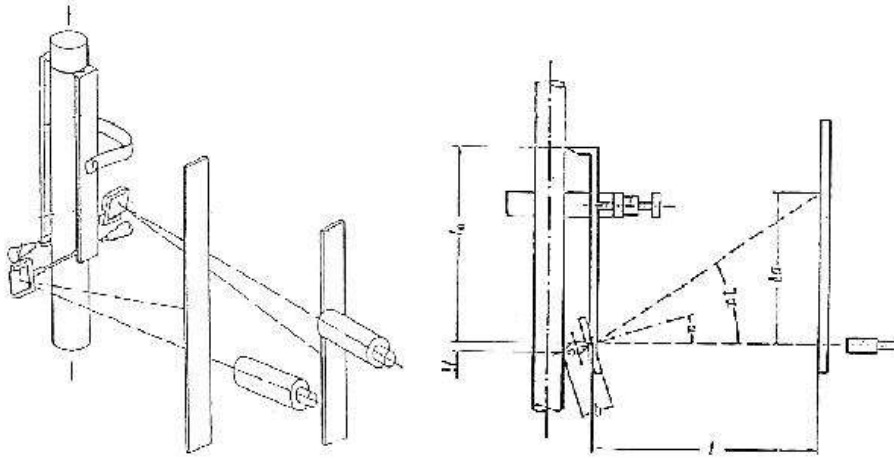
3.6. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazları

Kullanımı günümüzde tamamen ortadan kalkmış olan bu tip cihazlara, literatürde dahi güçlüklerle rastlanmaktadır. Konunun tarihi gelişiminin izlenebilmesi amacıyla, bu aşamada cihazla ilgili temel bilgiler verilecektir.

Martens aynalı kuvvet ölçme cihazının çekme kuvvetlerinin ölçümünde kullanılan tipi, ölçülen kuvvetin küresel tabanlı somunlar ve somun yatakları vasıtasıyla iletildiği basit bir silindirik çubuğa sahiptir.

Elastik gövde olarak basma çubuğu, çekme veya basma tipi elastik halkaların da kullanılabildiği bu tür cihazlarda, yükü taşıyan elastik gövdenin uzunluğunun, cihaza uygulanan kuvvet ile orantılı olarak değişimi Martens aynaları yardımı ile optomekanik olarak büyütüldükten sonra ölçülür (Şekil 3.55).

Genel olarak 60 kN'dan 10 MN'a kadar olan kuvvetlerin ölçümü bu cihazlar ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.55. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazı'nın (KÖC) Ölçüm Prensibi

Ölçüm prensibi Şekil 3.55'de verilmiş olan bu tip cihazlarda, iki veya dört adet baklava kesitli prizma, ölçüm rayları ile yükü taşıyan elastik gövde üzerindeki çentikler arasına, elastik gövde eksenine 90° veya 180° aralıklarla, ray kısıkaçları yardımıyla yerleştirilir. Elastik gövdenin uzunluğunun değişimine bağlı olarak açısal dönüm yapan aynalar, bu prizmalara sabitlenmiştir. Okuma dürbünleri kullanılarak, cetvel üzerinden aynaların dönümüne karşılık gelen gösterge değeri okunur.

Bu ölçüm yönteminin optik aktarım oranı (29) no'lu formül ile verilmiştir;

$$n = \frac{\Delta l}{\Delta \alpha} = \frac{b \cdot \sin \alpha}{L \cdot \tan 2\alpha} \quad (29)$$

n optik aktarım oranı,

Δl prizma ile ölçüm raylarının elastik gövdeye temas ettiği nokta arasında elastik gövdenin uzunluk değişimi,

Δa cetvelde okunan değer,

b prizmanın genişliği,

L ayna yüzeyi ile cetvel arasındaki mesafe,

α aynaların dönüm açısı.

$\alpha \ll 5^\circ$ olduğu durumlarda, daha da basitleştirilmiş olarak,

$$n \approx \frac{b}{2 \cdot L} \quad (30)$$

Klasik olarak 1/500'lük büyütme oranını elde etmek için, $L = 250 \cdot b$ olarak seçilir. Prizmanın genişliği, “b” prensip olarak 4,5 ila 4,6 mm arasındadır. Ölçüm raylarının uzunluğu, elastik gövdenin uzunluğuna bağlı olarak 100 mm, 150 mm, 200 mm veya 300 mm olarak seçilir. Bu cihazların çekme tipi için 200 mm, basma tipi için 150 mm boyunda ölçüm raylarının kullanılması önerilmektedir.

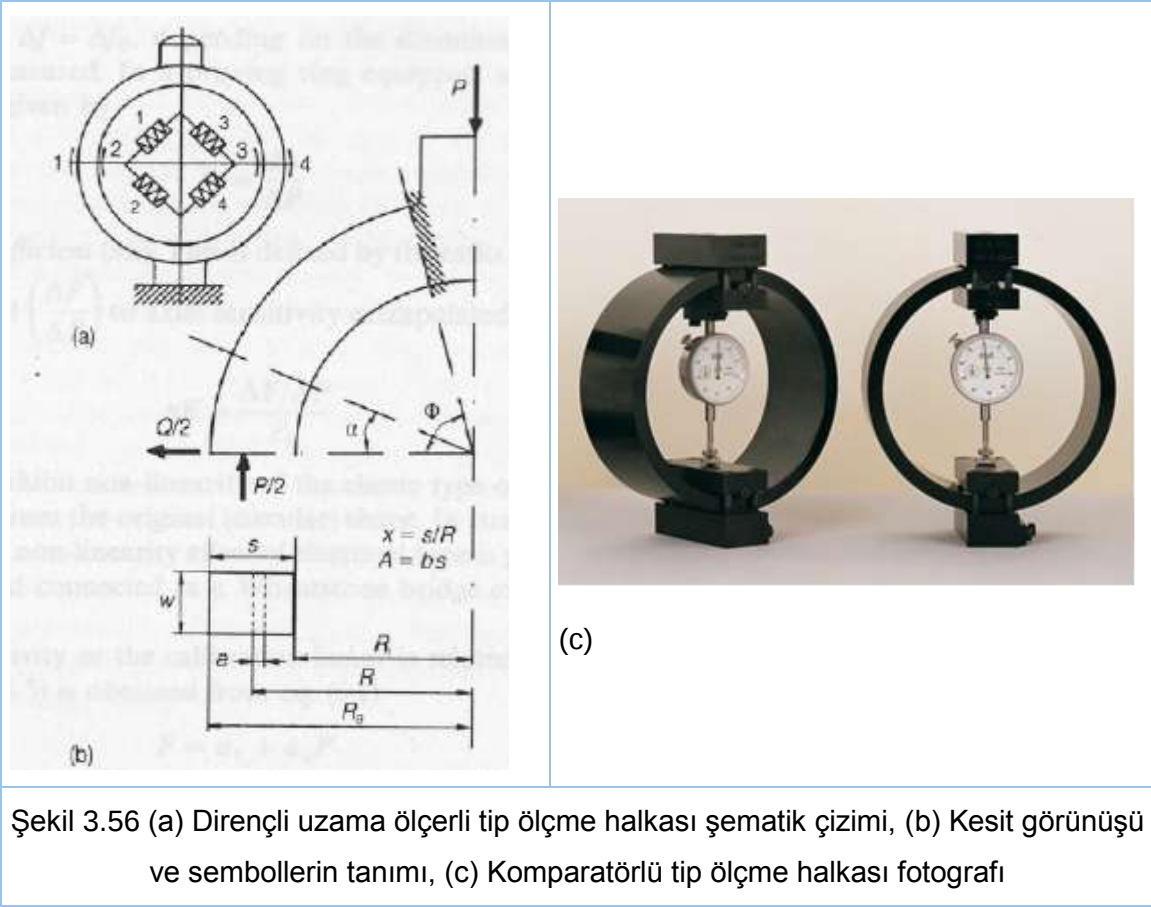
Bu yöntemde, elastik gövde üzerinde karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki adet prizma kullanıldığında, her iki cetveldен okunan değerlerin toplamı, uzunluk değişiminin 103 katına eşittir. Elastik gövde eksenine 90° aralıkla yerleştirilmiş dört adet prizma kullanılması durumunda, karşılıklı olarak yerleştirilmiş olan her bir çift ayna için elde edilen toplamların ortalaması alınır. Bu ölçüm yönteminin duyarlılığı, yaklaşık olarak 500 ölçek taksimatı ile sınırlıdır.

3.7. Ölçme Halkaları

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 makinalarının kurum içi gerçekleştirilen periyodik doğruluk kontrollerinde kullanılmaktadır.

Daire veya elips formu verilmiş olan ölçme halkaları, uygulanan yükün etkisi ile kuvvetin uygulandığı yönde bir boyutsal değişime uğrarlar (şekil 3.56). Ölçme halkaları, maksimum kapasiteyle yüklendiklerinde 1,27 mm ila 2,54 mm sehim yapacak şekilde tasarlanırlar. Ölçme halkasının ölçme kapasitesi arttıkça boyutlarının büyümesi ve aynı zamanda ağırlığının da artması en büyük dezavantajdır.

İnce dairesel formlu ve basma kafalı tip bir ölçme halkasının uygulanan kuvvetle göstereceği sehimin tasarım aşamasındaki hesaplamalarında (31) ve (32) no'lu formüller kullanılabilir:



Şekil 3.56 (a) Dirençli uzama ölçerli tip ölçme halkası şematik çizimi, (b) Kesit görünüşü ve sembollerin tanımı, (c) Komparatörlü tip ölçme halkası fotoğrafı

$$\frac{f_v}{R} = \frac{12k_v}{EA} \frac{P}{x^2} \quad (31)$$

$$k_v = \frac{1}{2} \phi + \frac{1}{4} \sin 2\phi - \frac{\sin^2 \phi}{\phi} \quad (32)$$

$$x = \frac{s}{R} \quad (a)$$

$$A = bs \quad (b)$$

f_v : Ölçme halkasının dikey yönündeki değişimi [mm],

P : Uygulanan yük [N],

R : Ölçme halkasının ortalama yarıçapı [mm],

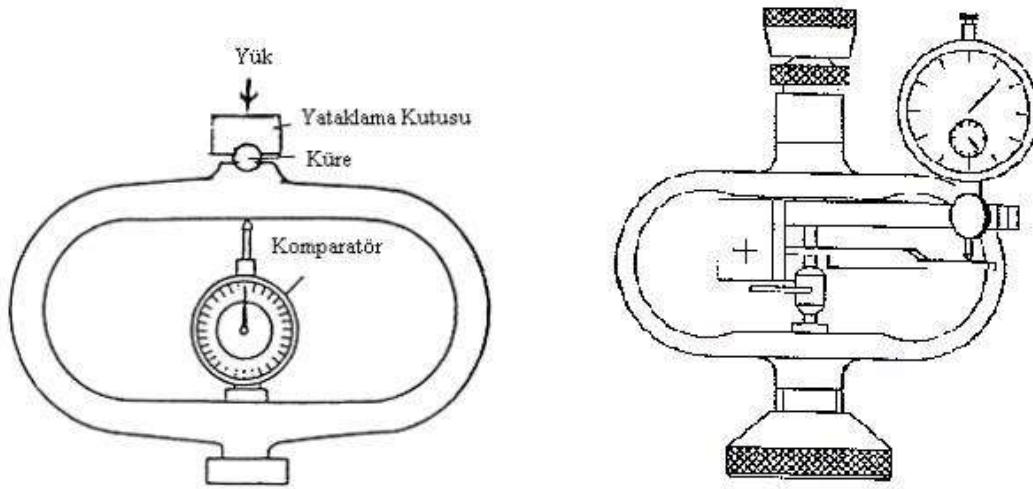
E : Ölçme halkasının malzemesinin elastiklik modülü [N/mm^2],

s : Ölçme halkası kesitinin genişliği [mm],

b : Ölçme halkası kesitinin kalınlığı [mm].

Uygulanan kuvvete karşılık gelen bir sehim elde edildikten sonra bunun ölçülmesinde sıklıkla kullanılan temel yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

Komparatörlü Ölçme Halkaları



Şekil 3.57. Komparatörlü Ölçme Halkası

Daire veya elips gibi farklı şekiller verilmiş olan elastik gövdenin deformasyonu, bir manivela sistemi veya bir yardımcı köprü aracılığı ile büyütülerek komparatör (Dial gauge, ölçme saati) yardımıyla ölçülür (şekil 3.57). Genel olarak kullanılan büyütme oranı 1:5'dir.

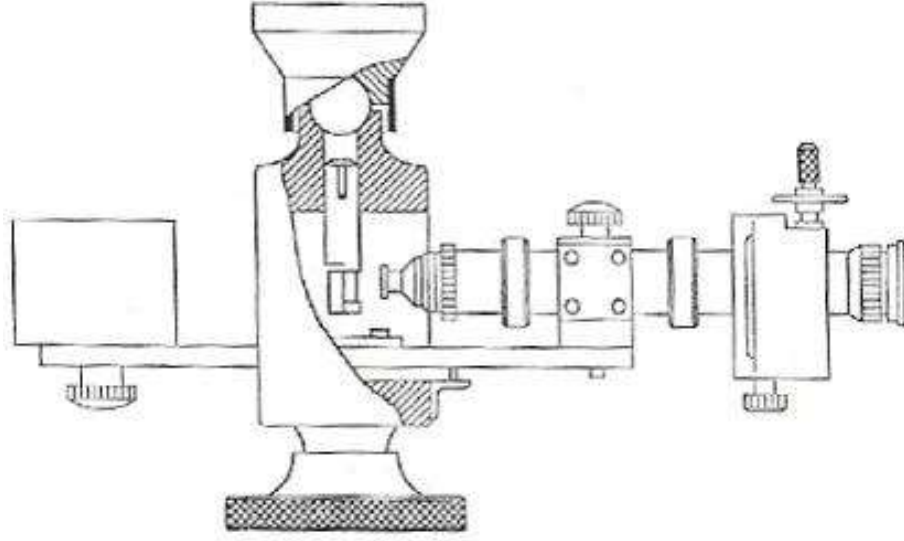
Bu tür ölçme halkalarında gösterge elemanı olarak kullanılan komparatörlerin metrolojik özelliklerinin yetersiz olması nedeniyle günümüzde kullanım alanı oldukça sınırlıdır. Komparatörün bu yetersizliği, özellikle tek bir seri ölçümde hem artan hem de azalan yönde ölçümler yapılacağı zaman belirgin bir histerisiz hatasının oluşmasına neden olur. Bu tür bir cihaz kullanılacaksa, bu cihazın sıfır noktası dikkatle takip edilmelidir. Genel olarak kullanılan komparatörler enterpolasyona izin vermediğinden, cihazın kalibre edildiği basamak kuvvet değerlerinde kullanılması tavsiye edilmektedir.

Spiral Mikroskoplu Ölçme Halkası

Bir manivela sistemi ve ona monte edilmiş bir ölçme saati yerine, bu tip cihazlarda elastik gövdenin ana deformasyon eksenine oturtulmuş bir cetvel mevcuttur (Şekil 3.58). Ölçme halkasının üst yüzeyine sabitlenmiş olan bu cetvelin uygulanan yük ile oluşan deformasyona bağlı hareketi, konstrüksüyona dâhil edilerek ölçme halkasının tabanına sabitlenmiş olan bir spiral mikroskop yardımıyla ölçülür.

Bu tip cihazlarda ölçme halkasının eni, manivela sistemi ve ölçme saati kullanılan tiplerindekinden bir miktar daha geniş tutularak, mikroskobun ağırlığının yarattığı eğme momentine karşı mukavemeti artırılmıştır.

Bir başka tipinde, mikroskobun ağırlığını dengelemek amacı ile karşı ağırlık kullanılmıştır. Bazı türlerinde ise şeffaf olarak seçilmiş cetvelin rahatça okunabilmesi için bir ışık kaynağı kullanılmaktadır ve bu kaynak aynı zamanda karşı ağırlık görevini de üstlenmektedir.

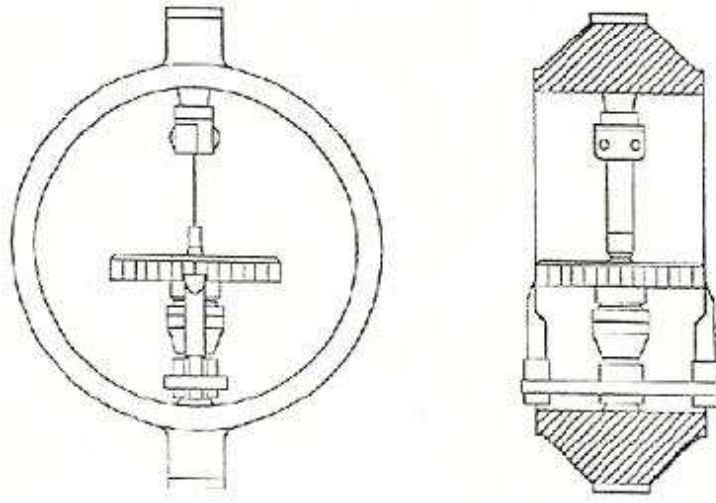


Şekil 3.58. Spiral Mikroskoplu Ölçme Halkası

Bu yöntemin temel avantajı, ölçümün herhangi bir büyütme veya aktarım sistemi olmaksızın yapılmasıdır. Elastik halkanın doğrusal deformasyonu maksimum 2,5 mm civarındadır. Spiral mikroskopun ölçek taksimatı 0.001 mm'dir. Uygun bir mikroskop kullanımı ile 5000 ölçek taksimatına ulaşmak mümkündür. Göstergenin hatası, ölçme saatindekinden daha küçüktür.

Sarkaçlı Ölçme Halkaları

Bu tür ölçme halkaları, daha çok Anglosakson ülkelerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ölçme halkasında oluşan deformasyonun ölçümü için Şekil 3.59'da şematik olarak gösterilmiş olan bu tip cihazlarda, sarkaç görevi yapan bir tel veya bir ince şerite, uygun bir cisim kullanılarak salınım hareketi verilir ve mikrometrik vida döndürülerek, ucun aşağı-yukarı hareketiyle tekrar durdurulur. Ölçülen yükte mikrometrede okunan değerden, yüksüz durumdayken kaydedilen değer çıkartıldığında, ölçülen yüke karşılık gelen ölçüm değeri elde edilmiş olur. Her ne kadar farklı kullanıcılar aynı halkayı kullanarak farklı sıfır noktaları bulsalar da kullanıcıdan kaynaklanan hatalar küçük olduğundan, tekrarlanabilirliği yüksek sonuçlar elde edilir.



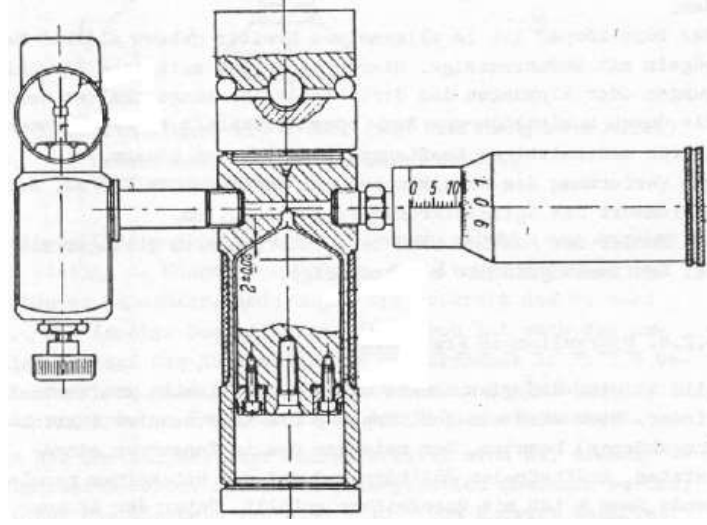
Şekil 3.59. Sarkaçlı Ölçme Halkası

3.8. Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazı

Günümüzde artık hemen hemen hiç kullanılmayan hidrolik tip kuvvet ölçme cihazları, daha çok metroloji müzelerinde teşhir edilmektedir. Uygulanan yükün etkisi altında oluşan elastik deformasyonun gözlenmesi prensibinin enterasan bir uygulaması olan bu tip cihazlarda, uzunluk değişimi yerine yük altındaki ölçme cihazında meydana gelen hacim değişimin gözlenmesi ölçüm prensibi olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.60'da açıkça görüldüğü üzere, yükü taşıyan elastik gövdenin içinde silindirik bir boşluk bulunmaktadır. Alttaki parça ise, yükü taşıyan elastik gövde içindeki boşluğu belirli bir hacim oluşturacak şekilde tamamlayacak boyutlara sahiptir.

Yükün ölçümü sıfır yöntemine göre yapıldığından, ölçüme başlanmadan önce sıfır ayarlayıcısı ile civa seviyesi cam tüp üzerindeki ölçek işaretine ayarlanır. Uygulanan yükün etkisiyle içi civa ile doldurulmuş olan boşluğun hacmi değişir. Hacmi sabit olan civanın artan kısmı ise sol taraftaki cam tüp boyunca taşar. Basma kuvvetinin etkisi ile taşarak cam tüpün içine dolan civa, konstrüksüyona dahil edilmiş olan bir mikrometre aracılığı ile tüp üzerindeki ölçek işaretine kadar geri çekilir. Mikrometre üzerindeki sayısal değer ile uygulanan kuvvet arasında bir ilişki kurulmuş olur.

Bu tip cihazlar maksimum 10 MN'a kadar üretilmişlerdir. En eski tiplerinde kendinden sıcaklık düzeltmesi olmadığından, gösterge değerinin sıcaklık değişimlerine olan bağımlılığı büyük olmuştur. Daha sonraları tüm gövde invar çeliğinden imal edilmiş, civanın doldurulacağı hacmi belirleyen alttaki parçanın boyutları ve civa hacmi uygun seçilerek bu sorun nispeten ortadan kaldırılmıştır. Bu cihazların imalatı ve montajı esnasında civanın doldurulduğu rezervuarda hiç hava kalmamasına özen gösterilmesi gerekmektedir.

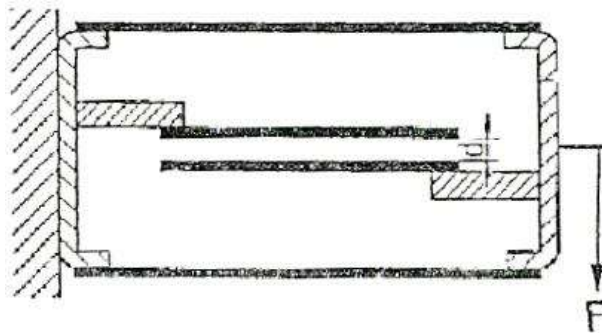


Şekil 3.60. Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazı

3.9. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları

Kapasitör veya kondansatör denilen eleman, temel olarak yalıtkan bir malzeme ile birbirinden ayrılmış iki plakadan oluşur. Kondansatörün kapasitesi, plakalar arasındaki mesafe ile ters, plakaların yüzey alanı ile doğru orantılı olarak değişir. Plakaların yüzey alanını değiştirmenin güçlüğünden dolayı plakaların arasındaki mesafe değiştirilerek ölçüm yapılır. Bunun için plakalardan bir tanesi sabit, diğeri ise uygulanan yüke bağlı olarak hareketlidir. Yükün uygulanmasıyla plakalar arasındaki mesafe değişir; bu da kapasitenin değişmesine neden olur (Şekil 3.61). Bir elektrikli titreşim devresinin elemanı olarak yerleştirilmiş bulunan bu kondansatörün kapasitesinin değişmesi bir akım değişimi meydana getirir. Ayrıca devrenin rezonans frekansı ve geçen akımın fazı da değişir.

Bu tip yük hücreleri dinamik kuvvet ölçümleri için tasarlanmış olup; geniş bir frekans çıkışına ihtiyaç vardır. Sıcaklığa karşı hassas olması ve elektrik devresinin karmaşıklığı ise en büyük dezavantajlarıdır.



Şekil 3.61. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazı Çalışma Prensibi

3.10. Kuvvet Ölçümlerinde Kullanılan Kalibrasyon Makinaları

“1 Newton’un 1 kg’lık kütleye 1 m/s² ivme veren etki” şeklindeki kuvvet tanımı, birimin gerçekleştirilmesinde kullanılmayan bir yaklaşımdır. Kuvvet biriminin pratik olarak gerçekleştirilmesinde kütleler üzerindeki yer çekimi etkisi prensip olarak kullanılır. En küçük belirsizlik değerine de ancak bu prensibi kullanan sistemlerle ulaşılır. Fakat büyük kapasiteli sistemler inşa edildiğinde ortaya çıkan hacimsel ve konstrüktif zorluklardan dolayı büyük kuvvet değerleri mekanik veya hidrolik ara sistem ve mekanizmalar aracılığı ile oluşturulur. Kullanılan ara mekanizmaların beraberinde taşıdıkları hatalar ve diğer harici etkilerden dolayı sistemin toplam belirsizliği, doğrudan kütlelerin kullanıldığı sistemlerin sahip olduğu belirsizlik değerinden daha büyüktür.

Temel olarak kuvvetin yüksek doğrulukla oluşturulmasında kullanılan makina tipleri şunlardır:

- Ölü ağırlıklı makinalar: Bunlar yerçekimi etkisi altındaki kütlelerin oluşturduğu kuvveti doğrudan kullanan makinalardır.
- Kuvvetin bir ara sistem ile büyütüldüğü makinalar (Manivela veya hidrolik büyütme): Bu makinalar yerçekimi etkisi altındaki kütlelerin oluşturduğu kuvvetin bir veya daha fazla sayıda manivela kullanılarak ya da bir piston silindir ünitesi ile (hidrolik olarak) büyütüldüğü makinalardır.
- Birden fazla kuvvet referans dönüştürücülü makinalar: Bu makinalar da birbirlerine paralel olarak bağlanmış referans kuvvet dönüştürücülerini kullanan sistemlerdir.

Bu makinalar, bir Ulusal Metroloji Enstitüsü’nde ve ülkedeki tüm kuvvet ölçümlerine referans teşkil etmek üzere kullanılıyorsa, Kuvvet Standardı Makinası (KSM) olarak adlandırılırlar. Ancak bu makinalar çeşitli imalat ve test noktalarında kullanılıyor ve metrolojik karakteristikleri ülkenin Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından belirlenmiş ise, Kuvvet Kalibrasyon Makinası (KKM) ismini alırlar.

Kuvvet kalibrasyon makinalarının kalibrasyon ve ölçüm yeteneği değerleri (CMC), kuvvet üretim biçimine bağlı olarak Tablo 3.14’de farklı makina tiplerine göre verilmiştir. Ölü ağırlıklı kuvvet kalibrasyon makinası ile oluşturulan kuvvet değerlerinin belirsizliği, ulusal kuvvet standardı makinasına benzer bir şekilde hesaplanabilir ve belirsizlik değeri 5×10^{-5} ’ten daha küçük olabilir. Ancak, ulusal kuvvet standardı makinalarına izlenebilirlik isteniyorsa veya ulusal kuvvet standardı makinası ile bir karşılaştırma yoluyla beyan edilen kalibrasyon ve ölçüm yeteneklerinin (CMC) doğrulanması gerekiyorsa, kuvvet kalibrasyon makinalarının kalibrasyon ve ölçüm yeteneklerinin (CMC), 5×10^{-5} ’ten daha küçük olduğunun gösterilmesi teknik olarak oldukça güç veya maliyetli olabilir. Beyan edilen kalibrasyon ve ölçüm yeteneği (CMC) değerinin 1×10^{-4} olması çoğu durumda kalibrasyon laboratuvarlarının gereksinimlerini karşılayabilir. Bir kalibrasyon laboratuvarı için bu ölçüm yeteneği EN ISO 376 standardında belirtilen en iyi sınıfa ait kuvvet ölçüm cihazının kalibrasyonu için yeterlidir.

Hidrolik ve manivela büyütmeli kuvvet makinalarında, daha düşük kalibrasyon ve ölçüm yeteneği (CMC) değerleri, kuvveti büyüten herhangi bir sistematik bileşenin düzeltilmesi ile gerçekleştirilebilir. Birden fazla referans kuvvet dönüştürücüyü içeren kuvvet kalibrasyon makina tipleri için, öncelikle makinada yer alan her bir referans kuvvet dönüştürücünün kalibrasyonu yapılır. Daha sonra transfer kuvvet dönüştürücülerin kullanımıyla birden fazla kuvvet dönüştürücüyü içeren tipteki kuvvet kalibrasyon makinalarının kalibrasyonu yapılmalıdır, bu suretle makinanın CMC değeri belirlenir.

Tablo 3.14. Kuvvet kalibrasyon makinalarının tiplerine göre kalibrasyon ve ölçüm yetenekleri

Kuvvet Kalibrasyon Makinası Tipi	Kalibrasyon ve Ölçüm Yeteneği (CMC) (Bağıl Genişletilmiş Belirsizlik)
Ölü Ağırlıklı	5×10^{-5} ile 1×10^{-4} arası
Hidrolik Büyütmeli	1×10^{-4} ile 5×10^{-4} arası
Manivela Büyütmeli	1×10^{-4} ile 5×10^{-4} arası
Bir veya Üç Referans Kuvvet Dönüştürücülü Sistemden Oluşan	5×10^{-4} ile 5×10^{-3} arası

Kuvvet oluşturma biçimine göre, kuvvet kalibrasyon makinalarında iki izlenebilirlik yöntemi vardır. Makinanın kalibrasyon ve ölçüm yeteneğinin (CMC), bununla birlikte belirsizliğinin değerlendirilmesi seçilen yöntemle göre yapılır.

A Yöntemine Göre İzlenebilirlik: Bu yöntemle göre, izlenebilirliğin kuvvet kalibrasyon makinalarına aktarımı ulusal kuvvet standardı makinalarında kalibrasyonu yapılan transfer standartları ile doğrudan gerçekleştirilir.

Kuvvet kalibrasyon makinalarında izlenebilirliğin aktarımı ile kalibrasyon ve ölçüm yeteneğinin (CMC) belirlenebilmesi için önerilen yöntem EURAMET Cg-04 dokümanı bölüm 5.2.'de verilmiştir.

B Yöntemine Göre İzlenebilirlik: Bu yöntemle göre, kuvvet kalibrasyon makinalarında izlenebilirlik kütle, uzunluk ve zaman gibi temel SI birimlerine bağlıdır.

3.10.1. Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları

Kütlesi “m” (birimi “kg”) ve yoğunluğu “ ρ_m ” (birimi “kg·m⁻³”) olan bir ağırlığın, yoğunluğu “ ρ_a ” (birimi “kg·m⁻³”) olan hava ortamında, Dünya'nın yerçekimi alanı etkisinde “g” (birimi “m·s⁻²”) aşağı doğru oluşturduğu net düşey kuvvet “F” (birimi “N”) (1) numaralı formül ile hesaplanır:

$$F = mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \quad (1)$$

(1) numaralı eşitlikteki kuvvet değerinin belirsizliğini hesaplamak için, denklemin sağ tarafında yer alan dört değişkenin belirsizlikleri; (2) numaralı formülde gösterildiği şekilde toplanabilir. (2 numaralı denklemde u_x ifadesi x değişkeninin standart sapması ile ilişkilidir.)

$$\left(\frac{u(F)}{F}\right)^2 \approx \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_a)}{\rho_m}\right)^2 + \frac{\rho_a^2}{\rho_m^2} \left(\frac{u(\rho_m)}{\rho_m}\right)^2 \quad (2)$$

(2) numaralı eşitlikte yer alan ifadelerin her birinin belirsizliğinin zamanla değiştiği dikkate alınmalıdır. Örneğin, hava yoğunluğu ve yerçekimi ivmesinden gelen belirsizlik değerleri yılın herhangi bir gününde değişim gösterebilmektedir. Bununla birlikte, kütle değerinden gelen belirsizlikte aşınma, kirlenme ve yüzey kalitesinin bozulması v.b. gibi nedenlerden dolayı uzun süre sonunda değişim gösterebilir.

Bu nedenle kuvvet belirlemesi işleminde, gerçek kütle değerinin belirlenemediği durumlarda, konvansiyonel kütle ifadesi kullanılır. Konvansiyonel kütle; kütle tartımının yapıldığı ortamın hava sıcaklığının 20°C ve bu ortamdaki havanın yoğunluğunun 1,2 kg·m⁻³ olduğu kabulüne dayanmaktadır. Aynı zamanda kullanılan referans kütlelerin yoğunluğu 8000 kg·m⁻³ kabul edilir. Referans kütle sertifikalarında konvansiyonel kütle değeri yer almaktadır. Bu durum çerçevesinde (1) ve (2) numaralı eşitlik aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

$$F = m_c g \left(1 - \frac{1.2}{8000} + \frac{(1.2 - \rho_a)}{\rho_m}\right) \quad (3)$$

ve

$$\left(\frac{u(F)}{F}\right)^2 \approx \left(\frac{u(m_c)}{m_c}\right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_a)}{\rho_m}\right)^2 + \left(\frac{1.2 - \rho_a}{\rho_m}\right)^2 \left(\frac{u(\rho_m)}{\rho_m}\right)^2 \quad (4)$$

Not: Eşitlik (2)'de olduğu gibi, (4) numaralı eşitlik aynı nedenlerden dolayı tam olarak doğru değildir, daha doğru bir versiyonu şu şekildedir:

$$\left(\frac{u(F)}{F}\right)^2 \approx \left(\frac{u(m_c)}{m_c}\right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_a)}{\rho_m}\right)^2 + \frac{[(\rho_a - \rho_{cal})^2 - (\rho_{cal} - 1.2)^2]}{\rho_m^2} \left(\frac{u(\rho_m)}{\rho_m}\right)^2$$

Ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasının belirsizlik bütçesi oluşturulurken manyetik, elektrostatik, yerçekimi etkisi, havanın kaldırma kuvveti ve aerodinamik etkiler dışında kuvvet oluşturan diğer parametrelerinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasında gerçekleştirilen ölçümde, cihaza uygulanan kuvvetin ölçüm eksenini ile dikey ve eş eksenli olması, bunun yanında ölçüm boyunca kuvvet dönüştürücüsüne uygulanan her bir kuvvetin ölçüm ekseninde oluşturacağı kuvvet vektörünün büyüklüğü de belirsizlik bütçesi oluşturulurken dikkate alınmalıdır.

Basma aparatlarının rijitliği ve basma yönünde kuvvet uygulamada meydana gelebilecek yanal kuvvetlerin etkisi gibi, diğer parametreler, kuvvet dönüştürücüsünün hassasiyetine bağlı olarak dönüştürücünün çıkışını etkileyebilir. Ancak bu durumun kuvvet dönüştürücüsünün ölçüm eksenini boyunca uygulanan kuvvetin belirsizliğine katkısı yoktur. Bu parametreler ancak Ulusal metroloji enstitülerinin (NMI) kalibrasyon ve ölçüm yetenekleri (CMC) beyanında vermiş oldukları belirsizliklerden biridir.

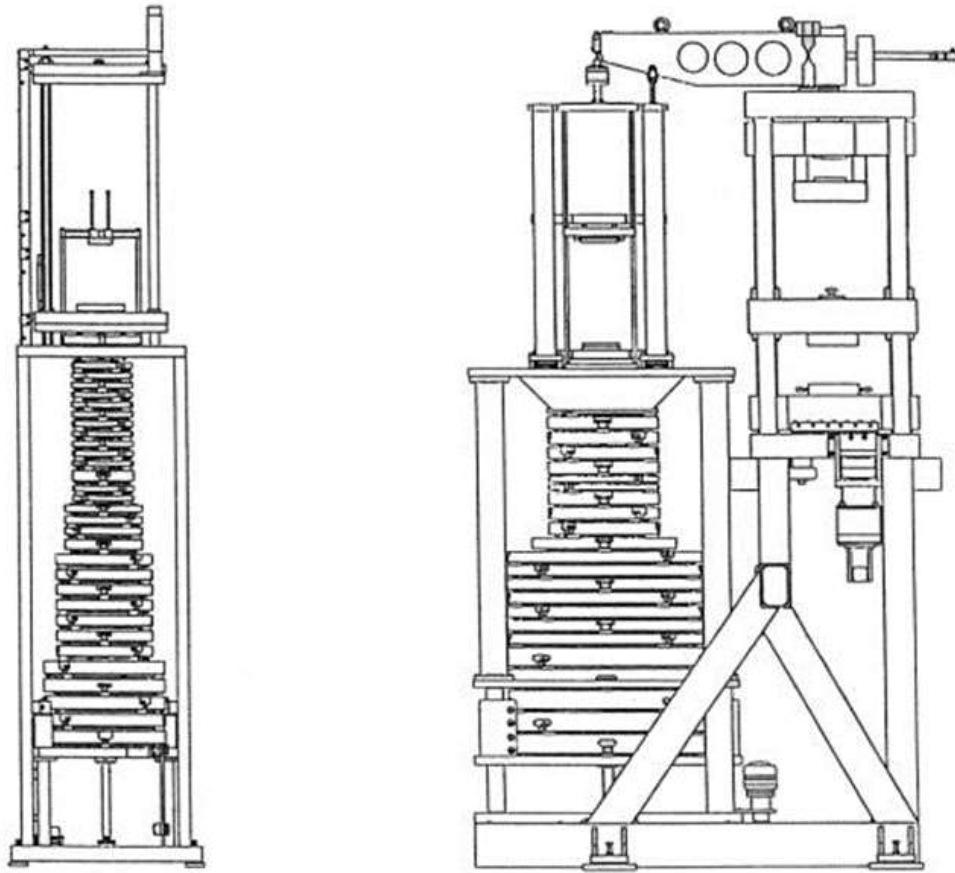
Ulusal metroloji enstitülerinin (NMI) gerçekleştirdiği kuvvet skalalarındaki ölçüm belirsizliği uluslararası karşılaştırmalarla belirlenir. Farklı ulusal metroloji enstitülerinin bünyelerindeki ölü ağırlıklı kuvvet standartları makinaları ile gerçekleştirdikleri ölçümlerdeki kuvvet değerlerinin bağlı genişletilmiş belirsizlik değeri 1×10^{-5} düzeyindedir. Ancak uluslararası karşılaştırmalarda, mekanik etkileşimlerin oluşturduğu belirsizlikler nedeniyle, farklı ölü ağırlıklı kuvvet standartları makinalarında gerçekleştirilen aynı kuvvet dönüştürücüsünün kalibrasyonunda elde edilen sonuçlar arasında önemli ölçüde farklılıklar ortaya çıkabilir.

Şekil 3.62’de genel görünüşü verilmiş olan makina TÜBİTAK UME Kuvvet Laboratuvarında bulunan 11 kN kapasiteye sahiptir. Artık standartlaşmış olan 1 kN, 2 kN, 5 kN ve 10 kN kuvvet dönüştürücü kapasite aralıklarını % 10’luk artırımlarla 10 adımda ve gerektiği takdirde % 10’luk aşırı yükleme yapabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Disk şeklinde 13 adet 100 N, 4 adet 200 N, 1 adet 300 N, 7 adet 500 N ve 5 adet 1 kN olmak üzere toplam 30 adet ölü ağırlık bir taşıyıcı tabla üzerine oturtulmuştur. Bu taşıyıcı tabla bir servo motor tahrikli sonsuz vida mekanizması yardımıyla aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Tablanın aşağı hareketi esnasında ilk kütle değerini oluşturan kefe kuvvet ölçme cihazının üzerine asılmakta onu takip eden diğer kütleler ise öncelikle bu kefeye ve sırasıyla da birbirlerine asılmaktadırlar. Kefeden bağımsız çalışabilen iki ara plaka, basma durumunda kuvvet dönüştürücüsünün oturduğu, çekme durumunda ise kuvvet dönüştürücüsünün asıldığı eleman olup, dönüştürücünün boyutlarına göre serbestçe hareket ederek ayar yapılmasını ve aynı zamanda da şok yükleme-boşaltmaların yapılabilmesine imkan sağlamaktadırlar. Makinanın nominal yüksekliği yaklaşık olarak 3.5 m ve taban alanı ise yaklaşık olarak $(70 \times 70) \text{ cm}^2$ dir.

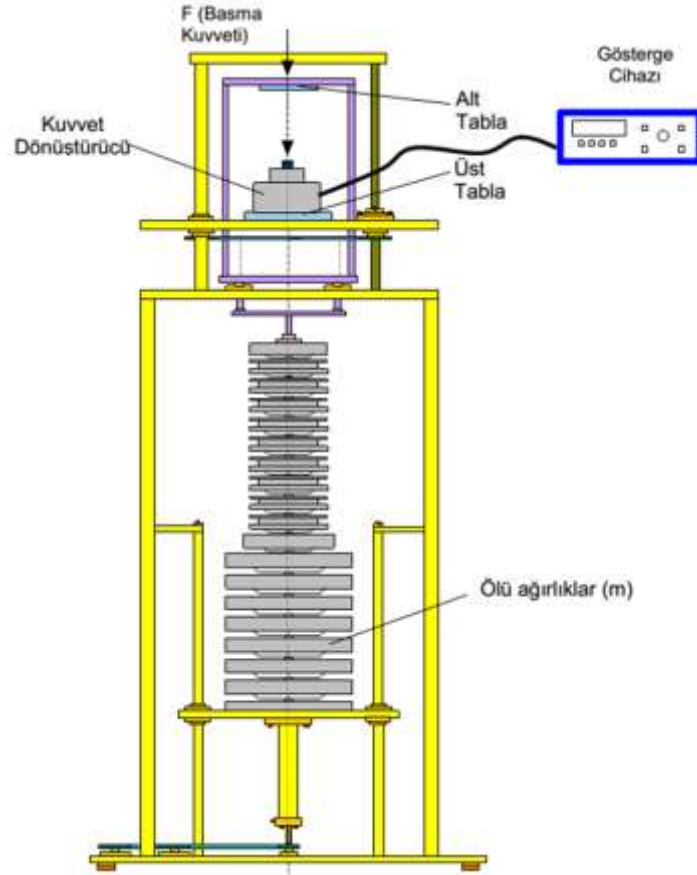
Dünyada kapasiteleri 4,4 MN’a kadar değişen çeşitli tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları mevcuttur. Bunların belirsizlikleri ise 1×10^{-5} ila 5×10^{-5} arasında değişmektedir.

Ancak verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır ve bazı laboratuvarların bu belirsizlik değerlerini tam kapasite üzerinden verdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla tam kapasitenin küçük değerlerinde bu belirsizlik değerleri büyümektedir.

Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının 110 kN'a kadar olan kısmını oluşturan ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinalarının belirsizlik seviyesi yapılan uluslararası karşılaştırmalı ölçüm neticesinde elde edilen sonuçlarla bugün için 2×10^{-5} olarak elde edilmiştir. Bu belirsizlik değeri tam kapasite üzerinden olmayıp, uygulanan her kuvvet değeri için verilmiştir.



Şekil 3.62. TÜBİTAK UME 11kN Ölü Ağırlıklı (soldaki) ve 110 kN / 1.1 MN Manivellalı Tip Ölü Ağırlıklı (sağdaki) kuvvet standardı makinaları prensip şekli



Şekil 3.63. Kuvvet Standardı Makinalarında Ölölme Cihazlarının Kalibrasyonunun Gösterimi

MODEL:

$$F = m_c g \left(1 - \frac{1.2}{8000} + \frac{(1.2 - \rho_a)}{\rho_m} \right)$$

$$\left(\frac{u(F)}{F} \right)^2 \approx \left(\frac{u(m_c)}{m_c} \right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_a)}{\rho_m} \right)^2 + \frac{[(\rho_a - \rho_{cal})^2 - (\rho_{cal} - 1.2)^2]}{\rho_m^2} \left(\frac{u(\rho_m)}{\rho_m} \right)^2$$

Uncertainty Component				Uncertainty Contribution				Sensitivity Coefficient		Uncertainty	Variance
Definition	Symbol	Value	Unit	Value	Unit	Distribution	Divisor	Value	Unit	/ N	/ N ²
Conventional mass	m_c	1 019.332	kg	0.003	kg	Gaussian	2	9.81 N kg ⁻¹		1.5E-02	2.2E-04
Acceleration due to gravity	g	9.811 819	m s ⁻²	0.000 002	m s ⁻²	Gaussian	2	1 019 N {m s ⁻² } ⁻¹		1.0E-03	1.0E-06
Density of weight	ρ_m	7 907	kg m ⁻³	50	kg m ⁻³	Gaussian	2	0.000 011 N {kg m ⁻³ } ⁻¹		2.8E-04	7.7E-08
Density of air	ρ_a	1.200	kg m ⁻³	0.024	kg m ⁻³	Gaussian	2	1.26 N {kg m ⁻³ } ⁻¹		1.5E-02	2.3E-04
sum of variances											4.5E-04
standard uncertainty										0.021	
expanded uncertainty (k = 2)										0.042	

Force	F	10 000.000 N
Density of air ρ_a to maximise $u(\rho_m)$ sensitivity	ρ_a	1.240 kg m ⁻³
Density of air during mass calibration	ρ_{cal}	1.160 kg m ⁻³

Şekil 3.64. Ölölü ağırlıklı kuvvet makinalarının belirsizlik modeli ve örnek hesabı

3.10.2. Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları

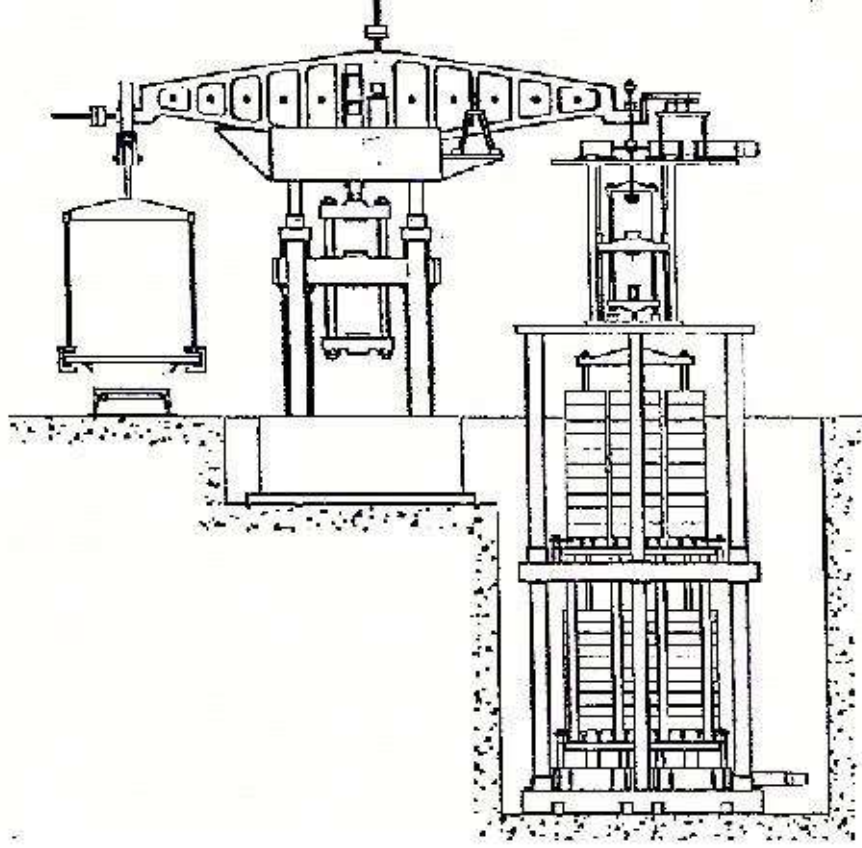
Manivela tipi kuvvet makinaları ölü ağırlıkları bir manivela aracılığıyla büyüterek kuvvet ölçme cihazlarının kalibre edildiği makinalardır. Manivela büyütme makinalarda, ölü ağırlıklı kütlelerin oluşturduğu kuvvet, bir veya daha fazla mekanik manivela sisteminin kullanımı ile büyütülür, manivela kolu uzunluğu oranı yaklaşık olarak kuvvet büyütmesine eşittir. Manivelalı ve karşı ağırlıklı sistemler gibi uygulanan kuvvetin yalnızca ölü ağırlıklarla oluşturulmadığı makinalarda, sürtünme kuvvetlerinden veya dengelenmemiş kuvvetlerden gelen etkilerin makinanın her bir ölçüm aralığında, belirsizlik bütçesi içine katılması gerekir.

Ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinalarının detayları, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü bünyesindeki Kuvvet Laboratuvarında kurulu 110 kN /1.1 MN kapasiteli makina örnek verilerek açıklanacaktır. Şekil 3.43'de genel görünüşü verilmiş olan bu makina iki kısımdan oluşmakta olup, ölü ağırlıklı kısımda 110 kN, manivela aktarımlı kısımda 1.1 MN nominal kapasiteye sahiptir. Ölü ağırlıklı kısımda standartlaşmış olan 20 kN, 50 kN, 100 kN kuvvet aralıklarını % 10'luk artımlarla 10 adımda ve gerektiği taktirde % 10'luk aşırı yükleme yapabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Makinanın bu kısmının çalışma prensibi yukarıda tarif edilen 11 kN kapasiteli makina ile aynıdır.

Makinanın ikinci kısmı ise, birinci kısımda ölü ağırlıklarla üretilen kuvvet değerlerini bir manivela yardımı ile on (10) kat büyütmetedir. Manivelalı kısımda artık standartlaşmış olan 200 kN, 500 kN, 1 MN kuvvet aralıkları % 10'luk artımlarla 10 adımda ve gerektiği taktirde % 10'luk aşırı yükleme yapabilecek kabiliyettedir. Makinada, 110 kN'a kadar olan kuvvetler ölü ağırlıklar yardımıyla üretildiği ve manivelalı kısımdan bağımsız çalışabildiği için ayrı bir kuvvet standardı makinası olarak ele alınabilir. Fakat manivelalı kısım tek başına kuvvet üretememekte, ölü ağırlıklara ihtiyaç duymaktadır.

Dünyada kapasiteleri 1.96 N'dan 2.4 MN'a kadar değişen çeşitli tip manivelalı ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları mevcuttur. Bunların belirsizlikleri ise 5×10^{-5} ila 2×10^{-4} arasında değişmektedir. Ancak verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır ve bazı laboratuvarların bu belirsizlik değerlerini tam kapasite üzerinden verdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla tam kapasitenin küçük değerlerinde bu belirsizlik değerleri büyümektedir. Ayrıca bazı makina tiplerinde ölü ağırlıklı kısım kullanılamamakta, dolayısıyla manivelanın değişik yüklerde gösterdiği sehime bağlı olarak kütle ayarlaması yoluna gidilmiştir. Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının 1.1 MN'a kadar olan kısmını oluşturan bu makinanın belirsizlik seviyesi yapılan uluslararası karşılaştırmalı ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlarla ölü ağırlıklı kısım için 2×10^{-5} , manivelalı kısım içinse 1×10^{-4} olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.65'da Çin Halk Cumhuriyeti'nde Primer Kuvvet Standardı olarak kullanılmakta olan konvansiyonel tip bıçak sırtı yatak ile donatılmış ve bir eş kollu terazi kolu ile akuple edilmiş manivelalı tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasına ait bir şematik resim verilmiştir. Burada kuvvet ve kütle büyüklüklerinin ölçüm uygulamalarında içiçe geçmiş iki büyüklük oldukları örneklenmektedir.

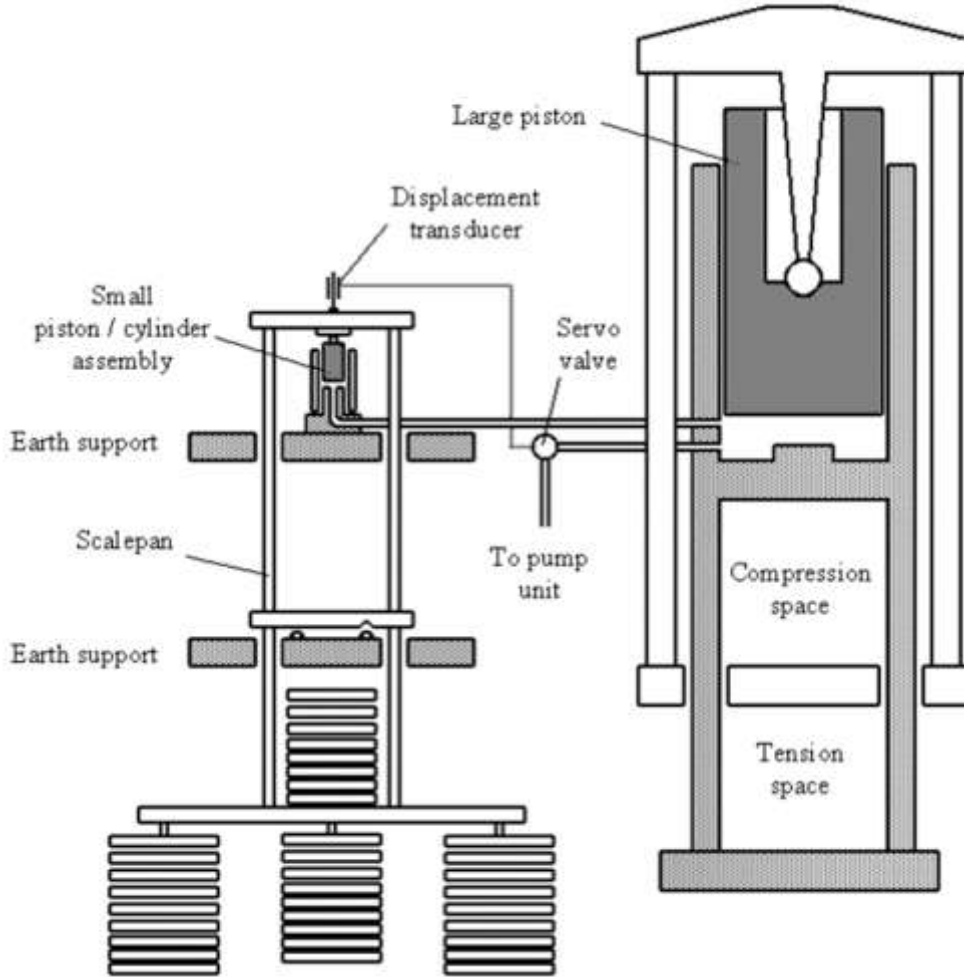


Şekil 3.65. 100 kN / 1 MN Kapasiteli, Konvansiyonel Tip Eşkollü Terazi (1 tonf) ile birleştirilmiş Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı KSM

3.10.3. Hidrolik Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları

Hidrolik büyütme makinalarda, ölü ağırlıklı kütlelerin oluşturduğu kuvvet, farklı yüzey alanlarına sahip piston silindir ünitesi üzerine uygulanır ve hidrolik bir sistem kullanılarak büyütülür. İki farklı yüzey alanının oranı yaklaşık olarak kuvvet büyütmesine eşittir. Temel olarak oluşan basıncın denge konumunda olduğu anda piston yüzeyleri arasındaki oranın, uygulanan kuvvet ile elde edilen kuvvet arasındaki oranı sağladığı prensibinden hareket edilerek geliştirilmiştir. Manivelalı sistemlerde olduğu gibi yerçekimi etkisindeki kütlelerin yarattığı kuvvet bir piston silindir ünitesi üzerine uygulanır. Oluşan basınç tamamen ayrı bir noktada yerleştirilmiş olan büyütme makinasının piston silindir ünitesine aktarılır. En büyük üstünlüğü bir tek ölü ağırlık piston silindir primer kombinasyonuna, birden fazla büyütme amaçlı piston silindir ünitesinin paralel bağlanabilmesidir. Böylelikle mevcut sistemin daha büyük kapasitelere çıkartılabilmesi için yapılması gereken tek şey yeni piston silindir ünitesinin sisteme dahil edilmesidir.

Şekil 3.66'da tipik hidrolik büyütmeli kuvvet standardı makinasına ait bir genel görünüş verilmiştir. Dünyada kapasiteleri 600 kN'dan 20 MN'a kadar değişen çeşitli tipte hidrolik makinalar mevcuttur ve belirsizlik değerleri de 1×10^{-4} ile 5×10^{-4} arasında değişmektedir.



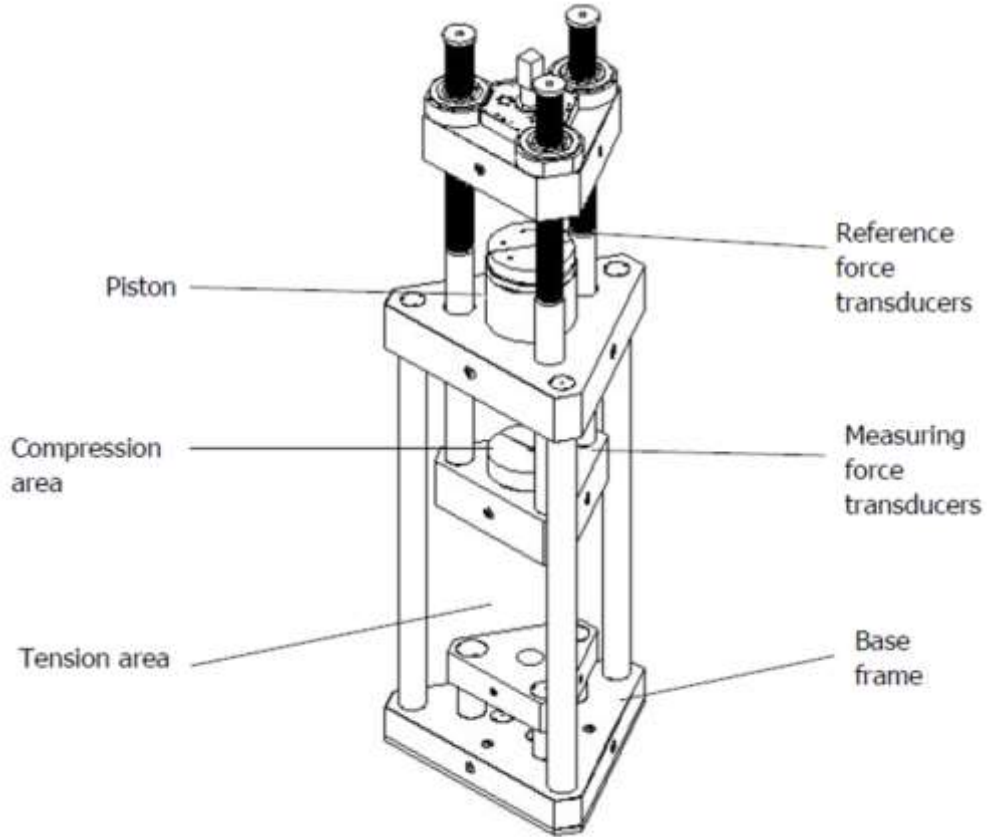
Şekil 3.66. Tipik hidrolik büyütmeli kuvvet standardı makinası şematik resmi

3.10.4. Birden Fazla Kuvvet Referans Dönüştürücülü Kuvvet Standardı / Kalibrasyon Makinaları

Bu makinaların ölçüm prensibi, kuvvet standardı makinasında her birinin ayrı ayrı kalibrasyonları yapılmış ve paralel yüklenmiş kuvvet dönüştürücülerine dayanmaktadır. Makinanın oluşturduğu kuvvet, her bir kuvvet dönüştürücüsünün tek başına ölçtüğü kuvvetin toplamından hesaplanır.

Gerek maliyet gerekse kapasite probleminin çok belirgin olduğu durumlarda kuvvetin ölü ağırlıklarla oluşturulması yerine, üstün nitelikli bir mekanik veya hidrolik pres ve yüksek vasıflı bir kuvvet ölçme cihazının biraraya getirildiği sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, nispeten daha büyük belirsizlik değerlerinin kabul edilebildiği uygulamalarda çok uygun bir çözüm olan bu sistemler için dünyada 100 kN ile 30 MN arasında değişen kapasitelere sahip çok sayıda makina mevcuttur. Bunların belirsizlik değerleri 2×10^{-4} ile 8×10^{-4} arasında değişmektedir. Ancak verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır.

Ayrıca oluşturulan kuvvetin belirlenmesinde kullanılan kuvvet ölçme cihazının sıklıkla bir primer standart ile kalibre edilmesi zorunluluğu ve kuvvet ölçme cihazlarının zaman içindeki davranışlarının tam olarak bilinmemesinden dolayı bu sistemler yüksek doğruluğun arandığı teknolojilerde ve primer seviyedeki laboratuvarlarda pek tercih edilmemektedirler. Şekil 3.67’de TÜBİTAK UME Kuvvet Laboratuvarında bulunan yurt içi imkanlarla yaptırılan, piston silindir ünitesi ve referans kuvvet dönüştürücü yardımıyla kuvvet üreten 3 MN Kapasiteli Piramit (Build-up) kuvvet standardı makinası prensip şekli görülmektedir.



Şekil 3.67. Tipik referans kuvvet dönüştürücülü kuvvet standardı makinası şematik resmi

KAYNAKLAR

- [1]. Measurements Group Yayını, 1984. Modern Strain Gage Transducers, Epsilonics, Measurements Group Inc., U.S.A.
- [2]. Measurements Group Yayını, 1988. Strain Gage Based Transducers, Their Design And Construction, Measurements Group Inc., USA
- [3]. Measurements Group Yayını, 1989, Measurements Group -Vishay-U.S.A. Technotes
- [4]. Measurements Group Katalog, Transducer Class Strain Gages, Measurements Group Inc., USA.
- [5]. Bray, A., Barbato, G., Levi, R., 1990. Theory And Practice Of Force Measurement, Academic Press, London
- [6]. Technical Note, 1978. Strain Gage Installation Procedures For Transducers, Measurement Group Inc. USA
- [7]. Technical Note, 1979. Optimising Strain Gage Excitation Level, Measurement Group Inc., TN-502, USA.
- [8]. Technical Note, 1983. Errors Due To Misalignment Of Strain Gages, Measurement Group Inc., TN-511, USA.
- [9]. Technical Note, 1992. Strain Gage Thermal Output And Gage Factor Variation With Temperature, Measurement Group Inc., TN-504-1, USA
- [10]. Aydemir, B., 2003, 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik kuvvet dönüştürücü yay elemanlarının iç yapısal özelliklerinin performans üzerine etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir
- [11]. Kaufmann, R., 1983. Messwertaufnehmer Auf DMS_Basis Und Ihr Temperaturverhalten, Messen Und Prüfen, December, S.745-750
- [12]. Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan, C., (2017), “Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı”, G2KV-010, TÜBİTAK UME, Gebze-Kocaeli, Aralık 2017.
- [13]. Stefanescu, D. M., Anghel M. A., (2013), “Electrical methods for force measurement – A brief survey”, Measurement 46, 949–959.
- [14]. EURAMET cg-04, Uncertainty of Force Measurements Version 2.0, 2011.
- [15]. Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C., 2015, EURAMET-cg-04, Kalibrasyon Rehberi, “Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik” TÜBİTAK UME, Şubat 2015
- [16]. Stefanescu, D. M. (2011), Handbook of Force Transducers, Berlin: Springer-Verlag.
- [17]. Singhab,A.P., Ghoshala,S.K, Kumar,H., (2018), “A contemporary investigation of force transducers: Past and present scenario”, Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 56, pp. 717-727.
- [18]. Fank, S., 2002, Kuvvet Dönüştürücülerinde Yay Elemanı Malzemesi Özelliklerinin Performans Üzerindeki Etkisi, Doktora tezi, İTÜ, İstanbul
- [19]. Test & Measurement Force and Strain - Measurement Equipment for Demanding T&M Applications, www.kistler.com, Ziyaret tarihi: 5 Mart 2019.
- [20]. Force Sensors, www.kistler.com, Ziyaret tarihi: 1 Mart 2019.
- [21]. Instruction Manual - Press Force Sensor, www.kistler.com, Ziyaret tarihi: 18 Mart 2019.
- [22]. Aydemir, B., Özgen, D., Durgut, Y., Küçük, O., Özal, A.S., Tosun, İ., (2016), “Dinamik Ölçümlerde Sensör Uygulamaları”, IMSEC 2016, p. 1046-1054.

- [23]. <https://www.hbm.com/en/3215/strain-gauges-or-piezoelectric-sensors/>, Ziyaret tarihi: 13 Mart 2019.
- [24]. <https://www.ele.com/product/50kn-clamped-boss-load-ring-/422>, Ziyaret tarihi: 15 Mart 2020.
- [25]. AYDEMİR, B., AYAN, E., ELMAS, B.S., DİZDAR, H. (2019), Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Yapısı, Avantajları ve Kalibrasyonu, 4th International Mediterranean Science and Engineering (IMSEC 2019), Alanya/Turkey.
- [26]. KODAMA, K., KESAMARU, K., ADACHI, M., KAMIMURA, K., KUROSU, S. (2002), Force-measurement using gyroscopic force measuring system, 41st SICE Annual Conference (SICE 2002), Osaka/Japan.
- [27]. NAVRUZ, İ., YÜCEL, K., ÇETİNKAYA, F.K. (2016), Fiber Optik Jiroskop Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Ankara Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi.
- [28]. SUNG, W.T., SUNG, S.K., LEE, J.G., KANG, T.S. (2007), Design and performance test of a MEMS vibratory gyroscope with a novel AGC force rebalance control, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, 10.
- [29]. Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., Decarlo, M., Campanella, C.E. (2017), Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective, Sensors, 17(10), 2284.
- [30]. <http://www.code7700.com/gyroscopes.htm> (Ziyaret tarihi: 2 Nisan 2019).
- [31]. <https://tr.redsearch.org/images/3893977#images-7> (Ziyaret tarihi: 4 Nisan 2019).
- [32]. Stefanescu D. M., Anghel M. A., (2013), "Electrical methods for force measurement – A brief survey", Measurement 46, 949–959
- [33]. Hauptmann, P.: Sensors: Principles and Applications. Carl Hanser Verlag, Munich(1991)
- [34]. Platil, A.: Mechatronics Sensors. PPT-05-force-b on Internet, January 3 (2005)
- [35]. Wieringa, H.: Electrical force measuring transducers. In: Proc. Symposium Force, Pressure, Displacement and Flow Sensors, May 13-14, pp. 179-197. Twente University of Technology, Enschede, The Netherlands (1982)
- [36]. Turner, J.D., Austin, L.: Sensors for automotive telematics (review article). Measurement Science and Technology 11, R58–R79 (2000)
- [37]. Lupu, N.: Magnetostriction versus magnetoelastic effects. European School on Magnetism, Cluj-Napoca, Romania, September 9-18 (2007)
- [38]. Hauptmann, P.: Sensors: Principles and Applications. Carl Hanser Verlag, Munich(1991)
- [39]. Boll, R., Borek, L.: Magnetic sensors of new materials. SIEMENS Forschungs- und Entwicklungsberichte 10(2), 83–90 (1981)
- [40]. Daga, A., Ganesan, N., Shankar, K.: Behavior of magneto-electro-elastic sensors under transient mechanical loading. Sensors and Actuators A: Physical 150(1), 46–55 (2009)
- [41]. Oppermann, K., Zagar, B.G.: A novel magneto-elastic force sensor design based on Terfenol-D. In: Proceedings SENSOR + TEST Conference 2009, Nuremberg, Germany, May 26-28, vol. 2, pp.77–82 (2009)
- [42]. Foşalău, C., Postolache, O., Creţu, M.: A novel transducer for force and angle measurement based on magnetostrictive amorphous wires. In: Proc. 44th International Scientific Colloquium IWK 1999, Ilmenau, Germany, September 20-23, pp. 257–261 (1999)

- [43]. Chiriac, H., Hristoforou, E., Neagu, M., Borza, F.: Force measurements using Ferich morphous wire as magnetostrictive delay line. *Sensors and Actuators A: Physical* 91, 223–225(2001)
- [44]. Bieńkowski, A., Szewczyk, R.: The possibility of utilizing the high permeability magnetic materials in construction of magnetoelastic stress and force sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* 113(3), 270–276 (2004)
- [45]. Zakrzewski, J.: New magnetoelstic force transducer. In: *Proc. XIIIth IMEKO World Congress*, Turin, Italy, September 5-9, vol. I, pp. 241–245 (1994)
- [46]. Salach, J., Bieńkowski, A., Szewczyk, R.: Magnetoelastic, ring-shaped torque sensors with the uniform stress distribution. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems* 1(1), 66–68 (2007)
- [47]. May, L.A.: Magnetic-based force/torque sensor. European Patent EP 1274974 (2003)
- [48]. Torductor Torque measurement with Pressductor Technology. ABB Automation Products AB, Västerås, Sweden, PDF created on October 16 (2007)
- [49]. <http://www.dynamag.com/index-en.html> (Ziyaret tarihi: 4 Eylül 2020)

4. KUVVET KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

Bir kuvvet ölçme sistemin performansının kontrolü yapılmadan ölçümlerinden emin olunamaz. Kuvvet ölçme sisteminin kullanıcının gereksinimlerini karşılaması ve gereken belirsizlik derecesini belirlenmesi için kalibrasyon yapılması gerekir.

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyon yöntemleri

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyon yöntemleri aşağıdaki şekilde listelenebilir.

a) Statik kuvvet kalibrasyon yöntemleri

- EN ISO 376: Metalik malzemeler - Tek eksenli deney makinalarının doğrulanmasında kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu, Metallic Materials - Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines
- ASTM E 74: Kuvvet Ölçme Cihazlarının kalibrasyonu ve doğrulaması için standart uygulamalar, Standard Practices for Calibration and Verification for Force-Measuring Instruments
- DKD-R 3-3: Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu
- BS 8422: Kuvvet ölçümü. Gerinim ölçer yük hücresi sistemleri. Kalibrasyon yöntemi - Force measurement. Strain gauge load cell systems. Calibration method

b) Sürekli kuvvet kalibrasyon yöntemleri

- DKD-R 3-9: Kuvvet dönüştürücülerinin karşılaştırma yöntemine göre sürekli kalibrasyonu

c) Dinamik kuvvet kalibrasyon yöntemleri

- Periyodik yöntemler
- Adım yöntemleri
- Şok yöntemi

Bu listelenen kalibrasyon yöntemleri arasındaki ana farklar aşağıda kısaca açıklanmıştır. Daha sonra detaylı olarak ele alınacaktır.

EN ISO 376 standardına göre statik kuvvet kalibrasyonu

EN ISO 376, malzeme test makinelerinin statik kalibrasyonu için kullanılan kuvvet ölçüm cihazlarının statik kalibrasyonunu açıklar. Tablo 1'de şematik kalibrasyon yükleme şekli gösterilmektedir. Her ölçüm serisi için artan ve/veya azalan ölçüm basamakları uygulanır ve her seri kalibrasyon süresi yaklaşık on dakika sürer.

Her ölçüm serisi için en az sekiz kuvvet ölçüm noktası gereklidir ve kalibrasyon üç farklı montaj konumunda gerçekleştirilmelidir. İlk montaj konumunda, iki artan ölçüm serisi uygulanır; ikinci ve üçüncü montaj konumunda ise bir artan ve bir azalan ölçüm serisi uygulanır.

ASTM E74 standardına göre statik kuvvet kalibrasyonu

ASTM E74, malzeme test makinelerinin statik kalibrasyonu için kullanılan kuvvet ölçüm cihazlarının statik kalibrasyonunu açıklar. ASTM E74 en az 30 kuvvet ölçüm noktası seçilmesini ve her birinin yaklaşık % 10 aralıklı olarak kuvvet noktalarının 3 seri uygulanmasını tarif eder.

DKD-R 3-3'e göre statik kuvvet kalibrasyon

DKD-R 3-3 kuvvet ölçüm cihazlarının statik kalibrasyonunu açıklar. Ancak bu yöntemle göre kalibreli cihazlar daha sonra malzeme test makinelerinin kalibrasyonu için kullanılamazlar. Bu metod, daha yüksek ölçüm belirsizliği veren basitleştirilmiş bir prosedürdür. Kalibrasyon metoduna bağlı olarak, ölçüm serisi başına daha az kuvvet ölçüm noktası (en az üç ölçüm noktasına kadar) uygulanır ve yalnızca bir montaj konumu kullanılır. Bazı metodlarında daha az ölçüm serisi veya azalan ölçüm serisi uygulanmaz. Tablo 1, artan ve azalan ölçüm değerlerine sahip bir ölçüm serisinin şematik kalibrasyon grafiği verilmiştir. Bir seri yaklaşık üç dakika sürer.

DKD-R 3-9'a göre sürekli kalibrasyon

DKD-R 3-9 kılavuzunda sürekli kalibrasyon işlemi, cihazın ölçüm kapasitesine kadar rampa şeklinde zaman davranışı ile sürekli bir kuvvet değişimi olarak tanımlanır. Bu yükleme şekli yarı statik olarak kabul edilebilir. Yükleme süresinin sıfırdan en yüksek kalibrasyon kapasitesine kadar geçen süresinin en az bir dakika olduğu varsayılır. Tablo 1, artan ve azalan ölçüm değerlerine sahip bir ölçüm serisinin şematik kalibrasyon grafiği verilmiştir.

Dinamik kalibrasyon (DKD-R 3-10'a göre)

Kuvvet ölçme cihazları ve malzeme test makinalarının dinamik kalibrasyonu ile ilgili olarak DKD dokümanlarında 3 adet dokümana ulaşılır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

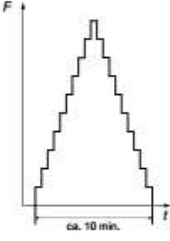
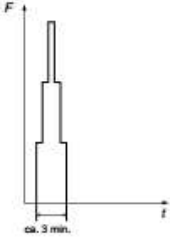
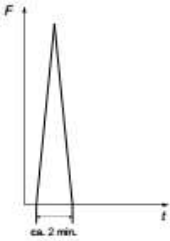
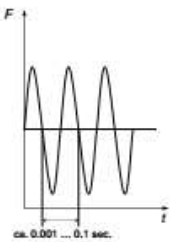
- DKD-R 3-10 Sheet 1. Tek eksenli kuvvet ölçme cihazları ve test makinalarının dinamik kalibrasyonu (temel prensipler) - Dynamic calibration of uniaxial force measuring devices and testing machines (basic principles)
- DKD-R 3-10 Sheet 2. Kuvvet dönüştürücülerin sinüzoidal metoda göre dinamik kalibrasyonu - Dynamic calibration of force transducers according to the sinusoidal method
- DKD-R 3-10 Sheet 3. Malzeme test makinalarının uygulama örnekleri kullanılarak dinamik doğrulaması - Dynamic verification of material testing machines using applied samples

DKD-R 3-10 Sheet 1 dokümanı kuvvet ölçüm cihazlarının dinamik kalibrasyonunu ele alır. Bu metodta, önemli ölçüde büyük ölçüm belirsizlikleri ortaya çıkmamaktadır.

Kalibrasyonun belirsizliğini düşürmek için, dinamik kalibrasyona ek olarak EN ISO 376'ya göre statik bir kalibrasyon yapılması tavsiye edilir. Dinamik kuvvet uyarımı, bir adım veya şok şeklinde uyarma ile periyodik olarak (örneğin, Sinüzoidal olarak) gerçekleştirilebilir. Tablo 4.1, belirli bir süre boyunca sabit tutulması gereken sinüzoidal kuvvet genliği şematik olarak verilmiştir. Dinamik bir kalibrasyon isteniyorsa, ek olarak, daha düşük bir ölçüm belirsizliğine sahip statik bir kalibrasyon ile desteklenmesi istenir.

Dinamik olarak kullanılan kuvvet dönüştürücülerinin seçimi ve değerlendirilmesi için genellikle ilk adım temel rezonans frekansı bilgisidir. Dinamik kalibrasyon için ilgili parametre olarak, kuvvet dönüştürücülerinin karakteristikleri hakkındaki temel rezonans frekansı VDI/VDE 2638 dokümanında belirtilmiştir. Ek olarak, bir kuvvet dönüştürücüsünün dinamik uygunluğu için sertlik ve kütle değerlerine de ihtiyaç vardır.

Tablo 4.1. Kuvvet ölçme cihazlarının farklı kuvvet kalibrasyon yöntemleri için kalibrasyon prosedürlerinin şematik gösterimi

Procedure	Schematic sequence of the calibration	Expected measurement uncertainty
DIN EN ISO 376		Class 1: > 0.12 % Class 0.5: > 0.06 % Class 00: > 0.01 %
DKD-R 3-3		~ 0.1 % to ~1 %
DKD-R 3-9		> 0.1 % to >1 %
Dynamic calibration		Approx. > 1 %

Malzeme test makinalarının kalibrasyon yöntemleri

Çekme ve basma test makinalarının kuvvet kalibrasyonu için mevcut yöntemlere ilave olarak yeni tarif edilecek dinamik kalibrasyon için kalibrasyon yöntemleri de tanımlanmıştır.

Malzeme test makinalarının kalibrasyon yöntemlerini aşağıdaki şekilde listelenebilir.

a) Statik kuvvet kalibrasyon yöntemleri

- EN ISO 7500-1: Metal malzemeler - Tek eksenli statik deney makinalarının doğrulanması - Bölüm 1: Çekme/basma deney makinaları - Kuvvet ölçme sisteminin doğrulanması ve kalibrasyonu - Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system
- ASTM E 4: Test makinalarının kuvvet doğrulaması için standart uygulamalar, Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

b) Sürekli kuvvet kalibrasyon yöntemleri

- Şu an tanımlanmadı

c) Dinamik kuvvet kalibrasyon yöntemleri

- Periyodik yöntemler
- Adım yöntemleri
- Şok yöntemi

Bu listelenen kalibrasyon yöntemleri arasındaki ana farklar aşağıda kısaca açıklanmıştır. Daha sonra detaylı olarak ele alınacaktır.

EN ISO 7500-1 standardına göre statik kuvvet kalibrasyonu

Çekme ve basma test makinalarının statik kuvvet kalibrasyonu EN ISO 7500-1'e göre yapılır. Şematik kalibrasyon prosedürü Tablo 2'de gösterilmiştir. Kalibrasyon genellikle % 10,% 20,% 40,% 60,% 80 ve % 100 ölçüm kuvvet noktalarında gerçekleştirilir. Daha hassas ölçüm istenirse, ölçüm serileri ek ölçüm noktaları ile desteklenebilir (örneğin % 0.1, % 0.2, % 0.4, % 0.7, % 1, % 2, % 4 ve % 7 ölçüm noktaları ile). Genellikle, artan ve azalan bir ölçüm serisi için kalibrasyon süresi yaklaşık beş dakikadır. İlgili kuvvet serisi uygulanırken, kuvvet adımı birkaç saniye sabit tutulması istenir veya bu mümkün değilse, kalibrasyonu istenen ölçüm noktasında yavaşça artan bir kuvvetle veri alınmasına izin verilir. 3 seri yükleme uygulanması tarif edilir.

ASTM E4 standardına göre statik kuvvet kalibrasyonu

ASTM E4, malzeme test makinalarının statik kalibrasyonu statik kalibrasyonunu açıklar. ASTM E4 her birinin yaklaşık eşit aralıklı olarak kuvvet adımlarının belirlenmesi gerektiği ve 3 seri şeklinde yüklemenin yapılması tarif edilir.

Dinamik kalibrasyon

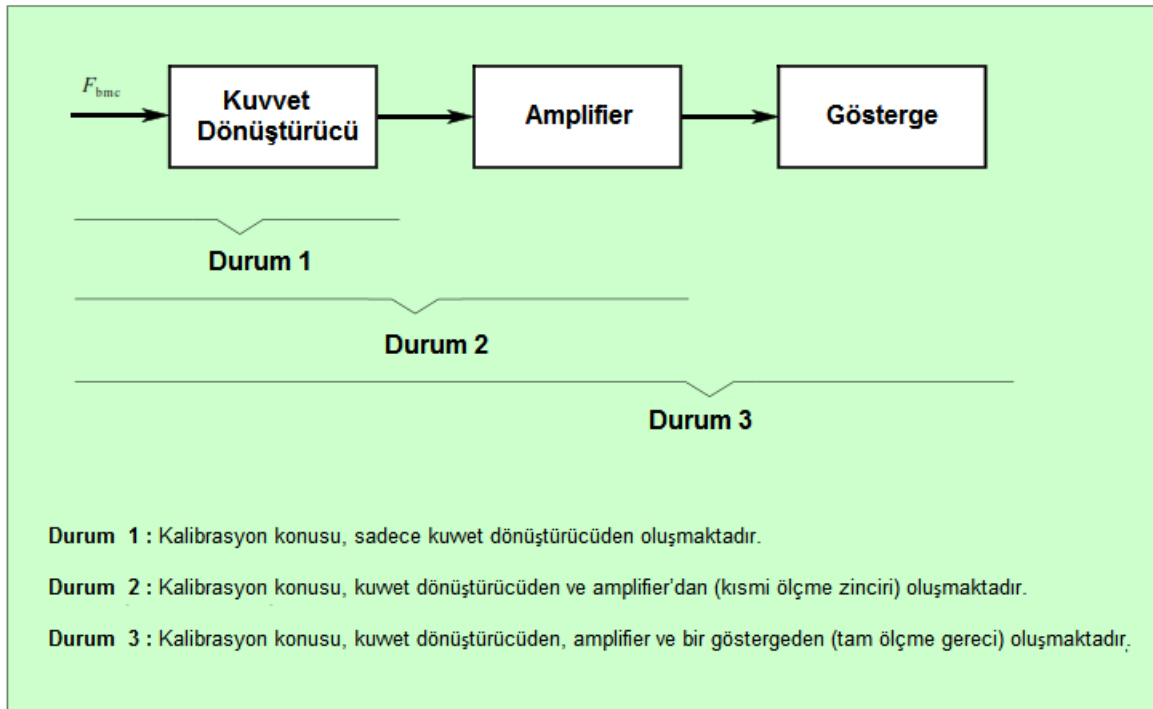
DKD-R 3-10 kılavuzu, malzeme test makinalarının dinamik kalibrasyonunu ele almaktadır. Burada statik kalibrasyondan daha büyük ölçüm belirsizlikleri beklenir. Kalibrasyonu belirsizliğini düşürmek için, dinamik kalibrasyonu tamamlayan EN ISO 7500-1'e göre statik bir kalibrasyon yapılması gerekir. Tablo 4.2, belirli bir süre boyunca sabit tutulması gereken sinüzoidal kuvvet genliği şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Malzeme test makinalarının farklı kuvvet kalibrasyon yöntemleri için kalibrasyon prosedürlerinin şematik gösterimi

Procedure	Schematic sequence of the calibration	Expected measurement uncertainty
DIN EN ISO 7500-1		Class 1: 0.24 % Class 0.5: 0.12 %
Dynamic calibration		Approx. > 2 %

4.1. Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonundan Önce Bilinmesi Gerekenler

Kuvvet ölçme cihazları, kuvvet dönüştürücü (sensör, kuvvet algılama elemanı), yükseltici (uyarlayıcı, güçlendirici, amplifier) ve bir gösterge elemanından (gösterge donanımı, indikatör, ekran) oluşur. Kuvvet dönüştürücüde algılanan kuvvet yükseltici ile daha hassas okumayı sağlayabilmek amacıyla güçlendirilir ve gösterge elemanı ile kullanıcıya kuvvet değeri aktarılmış olur. Kuvvet ölçme cihazlarını oluşturan 3 ekipmanın kalibrasyon yapılması esnasında kullanılmasına göre farklı durumlar Şekil 4.1’de tanımlanmıştır. Günümüzde amplifier ile gösterge elemanları genelde birleşmiş durumda gözlemlenir. Kalibrasyonlarda Durum 1 ve Durum 3 ile daha çok karşılaşılır. Kalibrasyonun yapılması açısından tüm durumlar için bir farklılık yoktur. Sadece kullanıcılar açısından durumlar arasında ölçüm belirsizlik değerlerinde farklılıklar ortaya çıkacaktır. Tavsiye edilen kuvvet ölçme cihazının Durum 3 şeklinde tüm ekipmanları ile kalibre edilmesidir. Bu sayede kullanıcı, sisteminin performansını, hatasını ve belirsizlik değerini tam olarak elde etmiş olacaktır.



Şekil 4.1. Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonundaki durumlar arasındaki farklar

Kalibrasyona başlamadan önce yapılması gerekenler aşağıda özetlenmiştir.

Kalibre Edilebilirlik

Kalibrasyonun yapılabilmesi, kalibre edilecek cihazın kalibre edilebilirliğine (uygunluğuna) bağlıdır. Bu durum, kalibre edilecek cihazın o anki durumunun genel bilinen teknik kurallara uygun olması gerektiği anlamına gelmektedir.

Kalibrasyona başlamadan önce sorunsuz bir kalibrasyon sürecinin sağlanması için cihazın durum ve fonksiyon denetimleri yapılmalıdır.

Durum denetimleri şunları kapsamalıdır.

- Cihazın gözle denetimi,
- Cihaz etiketinin (bilgileri) yazı/okunabilirlik açısından gözle denetimi,
- Kalibrasyon için gerekli olan evrakların (teknik bilgiler, kullanım kılavuzları) mevcut olup olmadığının denetlenmesi vb.

Fonksiyon denetimleri ise şunları kapsamalıdır.

- Elektrik açısından fonksiyon yeterliliği,
- Ölçme sinyal donanımı,
- İzolasyon direnci,
- Sıfır sinyali (örneğin monte edilmemiş durumda) vb.

Kuvvet ölçme cihazları için diğer önemli husus ise bağlantı parçaları veya mekanik bağlantı aparatlarıdır. Bilindiği gibi, **kuvvet kalibrasyonlarında mekanik olarak bağlayamazsanız kalibrasyonu yapamazsınız**. Çünkü kuvvet uyguladığınız malzemeyi deforme edebilen veya hasara uğratabilen bir etkiye sahiptir.

Bağlantı veya montaj parçaları, kalibrasyon konusunun ayrılmaz parçası olarak görülmelidir. Montaj parçalarının hazırlanması, şekilleri ve özellikleri EN ISO 376 standardının Ek A bölümünde tanımlanmıştır. Kalibrasyon laboratuvarlarının tarif edilen parçaları kullanması önemlidir. Kalibrasyon öncesinde kuvvet ölçme sensörünün mekanik bağlantısı esnasında eksenel bozukluk ve uygun olmayan yanal kuvvet, moment bileşenlerin olmamasına dikkat edilmelidir.

Gösterge elemanlarının seçimi ve ayarları, kalibrasyon laboratuvarlarının (gerektiğinde müşteri ile anlaşarak) sorumluluğu altındadır. Belirlenebilen sistematik farklılıklar müşteri istediği takdirde düzeltilme yoluna gidilerek kalibrasyon sonucunda sertifikada belirtilmelidir.

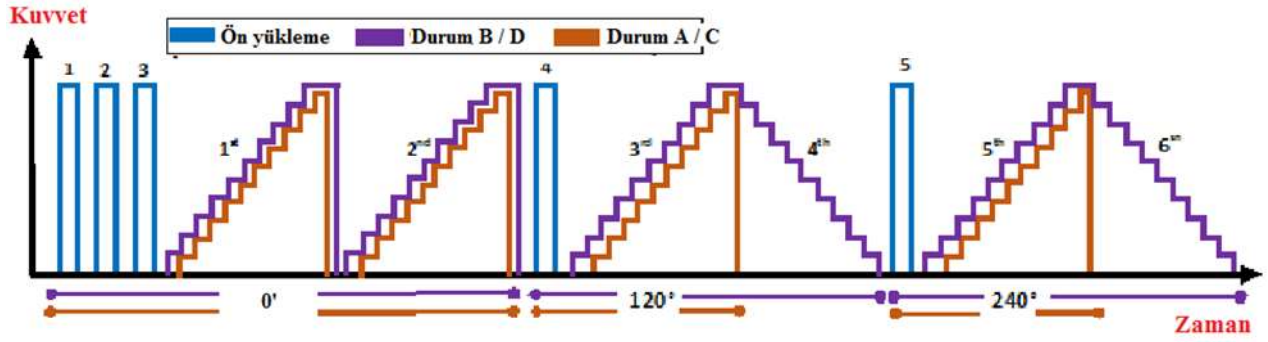
Yukarıda özetlenen bilgiler tüm kuvvet ölçme cihazı kalibrasyon yöntemleri için gerekli ve geçerlidir. Bu şartlar sağlandıktan sonra aşağıdaki yöntemler uygulanabilir.

4.2. EN ISO 376'a Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu

Kuvvet ölçme cihazlarının en yüksek doğrulukla kullanılacakları noktalar istisnai durumlar dışında "Tek Eksenli Malzeme Test Makinaları"nın kalibrasyonudur. Bir diğer yaygın kullanım noktası ise sertlik ölçme makinalarının kuvvet ölçme kısımlarının kalibrasyonudur. Bu standartta kuvvet kalibrasyonunun en genel tarifi, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin kuvvet ölçme cihazına uygulanması ve kuvvet ölçme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen ölçme sisteminden (gösterge cihazından) verilerin kaydedilmesi şeklinde açıklanmaktadır. Elbetteki, elektriksel ölçümlerin yapılması durumunda gösterge elemanı, en azından aynı ölçüm belirsizliğine sahip olduğu gösterilebilen bir başka gösterge elemanı ile değiştirilebilir.

Kalibrasyon İşlemi

Kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 376 standardına göre kalibrasyonu kısaca aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir. Öncelikle kuvvet ölçme cihazı, uygulanacak en büyük kuvvet kapasitesine kadar ön yük ile üç defa yüklenir. Her bir ön yükün uygulanma süresi 1 ila 1.5 dakika arasındadır. Ardından kuvvet ölçme cihazına artan değerlerde iki seri kalibrasyon kuvveti basamaklı olarak uygulanır. Bu esnada kuvvet ölçme cihazının pozisyonu değiştirilmez. Daha sonra, en az iki ilave seri artan ve azalan değerlerde belirlenmiş olan kalibrasyon kuvveti basamaklı olarak kuvvet ölçme cihazına uygulanır. Artan ve azalan değerlerde kalibrasyon kuvvetinin aşamalı olarak kuvvet ölçme cihazına uygulanması öncesinde en büyük kuvvet kapasitesine kadar bir defa ön yükleme işlemi gerçekleştirilmelidir. Her bir ilave kuvvet serisi arasında, ölçme cihazı kendi eksenini etrafında simetrik olarak, 360°'ye eşit olarak dağıtılmış konumlara (örneğin, 0°, 120°, 240°) döndürülür. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, (0°, 180°, 360°) gibi üç konumun uygulanması kabul edilebilir. Serilerdeki kuvvet basamakları yaygın olarak kuvvet ölçme cihazının en büyük kapasitesinin on kuvvet adımına bölünmesiyle elde edilecek kuvvetler şeklinde belirlenir. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda enterpolasyon eğrisinin belirlenebilmesi için, uygulanacak kuvvet basamak sayısı sekizden az olmamalıdır. Ayrıca bu kuvvetler, kalibrasyon bölgesi üzerinde mümkün olduğunca düzgün bir şekilde dağılmış olmalıdır. Aşağıda Şekil 4.2.'de, EN ISO 376 standardına göre çizilen kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda uygulanan kuvvet ile zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.2. EN ISO 376 standardına göre örnek kuvvet-zaman grafikleri

Yüklemeler arasında, yüksüz duruma karşılık gelen gösterge değerleri, sıfır yüke dönülmesinin ardından en az 30 saniye bekledikten sonra kaydedilir. Elektriksel kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna başlanmadan önce, sıfır sinyali kaydedilir.

Analog cihazlarda çözünürlüğün, göstergenin iki taksimat çizgisi arasının 1/2, 1/5 ya da 1/10 oranında bölünerek belirlenmesi tavsiye edilmektedir. Dijital cihazlarda çözünürlük ise yüksüz konumda eğer ekranda bir dalgalanma yok ise bir ekran artımı, ekranda bir dalgalanma var ise dalgalanma miktarının yarısı olarak alınmalıdır.

Yükleme Koşulları

Birbirini izleyen iki yükleme arasındaki zaman aralığı, mümkün olduğunca düzgün olmalı ve kuvvet değişiminin başlangıcından itibaren minimum 30 saniye geçmeden gösterge değeri alınmamalıdır. Kalibrasyon, $\pm 1^\circ\text{C}$ kararlılığı olan bir sıcaklıkta gerçekleştirilmeli, bu sıcaklık 18°C ila 28°C aralığında olmalı ve kaydedilmelidir. Kuvvet ölçme cihazının kararlı bir sıcaklığa ulaşması için yeterli zaman geçmelidir. Gerinim ölçerli dönüştürücüler, kalibrasyon öncesinde 30 dakikadan az olmamak kaydıyla, enerji kaynağına bağlanmalıdır.

Kuvvet Ölçme Cihazı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

EN ISO 376 standardına göre alınan veriler aşağıdaki hata değerleri hesaplanarak değerlendirilir.

Bağıl Tekrarlanabilirlik, Tekrar Gerçekleştirilebilirlik Hatası, $b' - b$

Bu hata, her bir kalibrasyon kuvveti için (1) ve (2) no'lu eşitlikler kullanılarak ölçme cihazının döndürüldüğü ve döndürülmediği konumlarda ayrı ayrı hesaplanır:

Dönümlü tekrarlanabilirlik (tekrar gerçekleştirilebilirlik) hatası,

$$b = \left| \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\bar{x}_r} \right| \cdot 100 \quad (1)$$

$$\overline{x_r} = \frac{x_1 + x_3 + x_5}{3} \quad (2)$$

Dönümsüz tekrarlanabilirlik hatası,

$$b' = \frac{|x_2 - x_1|}{\overline{x_{wr}}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\overline{x_{wr}} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (4)$$

Burada,

b : Dönümlü bağıl tekrarlanabilirlik (tekrar gerçekleştirilebilirlik) hatası

$x_{\max}$: Maksimum sehimi, 1,3 ve 5. Serilerdeki

$x_{\min}$: Minimum sehimi, 1,3 ve 5. Serilerdeki

$\overline{x_r}$: Dönümlü sehimlerin ortalama değeri

x_1, x_2, x_3, x_5 : Artan test kuvvetlerindeki sehimi

b' : Dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası

$\overline{x_{wr}}$: Dönümsüz sehimlerin ortalama değerini ifade eder.

Bağıl Enterpolasyon Hatası, f_c

Bu hata, sehim kalibrasyon kuvvetinin bir bağıntısı olarak veren birinci, ikinci veya üçüncü derece bir eşitlik kullanılarak belirlenir. Kullanılan bu eşitlik kalibrasyon raporunda belirtilir:

$$f_c = \frac{\overline{x_r} - x_a}{x_a} \cdot 100 \quad (5)$$

Burada,

f_c : Bağıl enterpolasyon hatası

x_a : Sehimin hesaplanmış değerini ifade eder.

Bağıl Sıfır Hatası, f_0

Sıfır değeri, testin her bir serisinden önce ayarlanır ve seri sonrasında kaydedilir. Sıfır gösterge değeri, yük tamamen kaldırıldıktan yaklaşık 30 saniye sonra alınır. Bağıl sıfır hatası aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100 \quad (6)$$

Burada,

f_0 : Bağıl sıfır hatası

X_N : Maksimum kapasiteye karşılık gelen sehimi

i_f, i_0 : Gösterge elemanın kuvvet kaldırıldıktan sonraki ve kuvvet uygulanmadan önceki gösterge değerini ifade eder.

Bağıl Tersinebilirlik Hatası, v

Bağıl tersinebilirlik hatası, artan ve azalan kuvvetlerde elde edilen değerler arasındaki fark olup aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$v_1 = \left| \frac{x_4' - x_3}{x_3} \right| \cdot 100 \quad (7)$$

$$v_2 = \left| \frac{x_6' - x_5}{x_5} \right| \cdot 100 \quad (8)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (9)$$

Burada,

v, v_1, v_2 : Bağıl tersinebilirlik hatası

$x'_{4,6}$: Azalan test kuvvetlerindeki sehim ifade eder.

Bağıl Çözünürlük Hatası, e

Bağıl çözünürlük hatası, çözünürlüğün her kuvvet adımındaki sehim ortalama değerine (çıktı değerine) oranıdır.

$$e = \frac{r}{\bar{x}_r} \cdot 100 \quad (10)$$

Burada,

e : Bağıl çözünürlük hatası

r : Gösterge elemanının çözünürlüğünü ifade eder.

Bağıl Sürünme Hatası, c

Bağıl sürünme hatası, maksimum yük uygulandıktan veya kaldırıldıktan 30 s sonrası ve 300 s sonrası alınan değerlerin ortalama maksimum kuvvet değerine oranıdır.

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{x_N} \right| \cdot 100 \quad (11)$$

Burada,

c : Bağıl sürünme hatası

i_{30}, i_{300} : Gösterge elemanın maksimum yük uygulandıktan veya kaldırıldıktan 30 s sonrası ve 300 s sonrası alınan gösterge değerini ifade eder.

Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırılması

Kuvvet ölçme cihazlarının sınıflandırma bölgesi, sınıflandırılma koşullarının yerine getirildiği en son kuvvet değerinde sona erer. Kuvvet ölçme cihazının sınıflandırılma bölgesi, Nominal kuvvet (F_N) değerinin en azından % 50'si ile % 100'ü arasındaki bölgeyi kapsamalıdır. Kuvvet ölçme cihazları, 4 farklı durumda sınıflandırma yapılabilir.

Durum A:

Belirli kuvvet değerleri için ve sadece artan yönde yüklemeler dikkate alınması durumunda:

- Bağlı yeniden üretilebilirlik (b'), tekrarlanabilirlik (b) ve sıfır hatası (f_0)
- Bağlı sürünme hatası (c)

Hatalarına göre sınıflandırılır.

Durum B:

Belirli kuvvet değerleri için ve artan/azalan yönde yüklemeler dikkate alınması durumunda:

- Bağlı yeniden üretilebilirlik (b'), tekrarlanabilirlik (b) ve sıfır hatası (f_0)
- Bağlı tersinebilirlik hatası (v)

hatalarına göre sınıflandırılır.

Durum C:

İnterpolasyon ve artan yönde yüklemeler dikkate alınması durumunda:

- Bağlı yeniden üretilebilirlik (b'), tekrarlanabilirlik (b) ve sıfır hatası (f_0)
- Bağlı interpolasyon hatası (f_c)
- Bağlı sürünme hatası (c)

hatalarına göre sınıflandırılır.

Durum D:

İnterpolasyon ve artan/azalan yönde yüklemeler dikkate alınması durumunda:

- Bağlı yeniden üretilebilirlik (b'), tekrarlanabilirlik (b) ve sıfır hatası (f_0)
- Bağlı interpolasyon hatası (f_c)
- Bağlı tersinebilirlik hatası (v)

hatalarına göre sınıflandırılır.

Sınıflandırmanın özet tablosunda aşağıda verilmiştir (Tablo 4.3). Bu hata değerleri için sınıflandırmalara göre müsaade edilen maksimum değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Sınıflandırma özet tablosu

Sınıflandırma	Sınıflandırma Kriterleri
Durum A	b' , b , f_0 , c
Durum B	b' , b , f_0 , v
Durum C	b' , b , f_0 , f_c , c
Durum D	b' , b , f_0 , f_c , v

Tablo 4.4. Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırılma Kriterleri

Sınıf	Kuvvet ölçme cihazının bağıl hataları, %						Kalibrasyon Kuvveti belirsizliği(k=2)
	Tekrarlanabilirlik		Enterpolasyon	Sıfır	Tersinebilirlik	Sürünme	
	b	b'	f_c	f_0	v	c	
00	0.05	0.025	± 0.025	± 0.012	0.07	0.025	± 0.01
0.5	0.10	0.05	± 0.05	± 0.025	0.15	0.05	± 0.02
1	0.20	0.10	± 0.10	± 0.050	0.30	0.10	± 0.05
2	0.40	0.20	± 0.20	± 0.10	0.50	0.20	± 0.10

Kalibrasyon Sertifikası

Kalibrasyon sertifikası EN ISO 376 standardına göre en az aşağıdaki bilgileri içermelidir:

- Kuvvet ölçme cihazının ve yükleme bağlantı parçaları ile kalibrasyon makinasının tüm elemanlarının tanıtılması (tip, üretici, seri no, yükleme parçaları, kalibrasyon makinası)
- Kuvvet uygulama yönü (çekme/basma)
- Cihazın ön testlerin gerekliliklerine uygun olması
- Cihazın sınıfı ve geçerli olduğu aralığı (veya kuvvetleri) ve yükleme yönü (sadece artan veya artan/azalan)
- Kalibrasyon tarihi ve sonuçları ile gerekli ise enterpolasyon denklemi
- Kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortamın sıcaklığı
- Kalibrasyon sonuçlarının belirsizliği
- Gerçekleştirilmişse sürünme ölçümünün detayları

Bu standardın amaçları bakımından, kalibrasyonlarda iki kontrol arasındaki süre veya sertifikanın maksimum geçerlilik süresi 26 ayı geçmemesi gerektiği standartta verilmiştir. Ayrıca kalibrasyonun, cihaz aşırı yüklendiğinde veya büyük bir bakım, onarım gördüğünde ise derhal tekrarlanacağı belirtilmiştir.

4.3. EN ISO 376'a Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kapsamındaki ölçüm belirsizliği hesaplaması, EN ISO 376 standardının Ek C kısmında ve EURAMET CG-04 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölüm, ilgili dokümanlar referans alınarak oluşturulmuştur.

Kuvvet ölçme cihazının kuvvet standardı makinasında kalibrasyonu EN ISO 376 standardına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, Tablo 1'de detaylandırılan ve ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, sürünme, sıfır, tersinebilirlik, çözünürlük, enterpolasyon, sıcaklık, kayma) bileşenler hesaplanır.

Kalibrasyon verileri elde edildikten sonra her bir kuvvet değeri için etki büyüklüklerinin bağıl değerleri hesaplanır. Aşağıda bu büyüklükler ve bunlara ait tahmini istatistiksel dağılım fonksiyonları verilmiştir. Bu dağılım fonksiyonlarının seçimi deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Bileşik belirsizlik aşağıdaki (12) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (12)$$

Genişletilmiş bağıl belirsizlik ise;

$$W = k \times w_c \quad (13)$$

Kuvvet biriminde belirsizlik ise aşağıdaki (14) numaralı eşitlik ile hesaplanır;

$$U = W \times F \quad (14)$$

Eşitliklerdeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

w_i : bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_c : cihazın toplam bağıl ölçüm belirsizliği

w_1 : Uygulanan kuvvetin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_2 : Kalibrasyon sonuçlarının yeniden üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_3 : Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_4 : Gösterge çözünürlüğünün bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_5 : Kuvvet ölçme cihazının sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_6 : Kuvvet ölçme cihazının sıfır değerindeki kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_7 : Kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_8 : Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

k : kapsam faktörü,

W : toplam genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği,

F : Kuvvet değeri,

U : Kuvvet birimde toplam genişletilmiş ölçüm belirsizlik değerini ifade eder.

Bu parametrelerin hesabı aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_1 :

Kalibrasyon kuvveti, kuvvet ölçme cihazına çekme ya da basma kuvvetini uygulayan sistemin sertifikasından bağıl belirsizlik değeri (U_{ref}) olarak alınır.

$$w_1 = \frac{U_{ref}}{2} \quad (k = 1) \quad (15)$$

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_2 :

Tekrar üretilebilirlik (dönümlü tekrarlanabilirlik) bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_2 = 100 \cdot \frac{1}{|\bar{X}_r|} \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2} \quad (15)$$

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_3 :

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$w_3 = \frac{b'}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_4 :

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_4 = 100 \cdot \frac{r}{\sqrt{6} \cdot X_r} \quad (17)$$

Sürünme ve tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_5 :

Eğer cihazın sınıflandırmasında sürünme hatası dikkate alınıyorsa, yani Durum A ve C için sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_5 = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

Eğer cihazın sürünme testi yapılmamış ise sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni tersinebilirlik hatasının 1/3'e dikdörtgen dağılım uygulanması ile hesaplanır. Bu durumda formül aşağıdaki (19) numaralı eşitlik şeklinde yazılır:

$$w_5 = \frac{v}{3\sqrt{3}} \quad (19)$$

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_6 :

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (20) numaralı eşitlik ile hesaplanır:

$$w_6 = f_{0 \max} \quad (20)$$

Sıcaklık bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_7 :

Sıcaklık bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_7 = 100 \cdot \frac{K \cdot \Delta T}{2\sqrt{3}} \quad (21)$$

K: Kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişim faktörü (üretici tarafından verilir),

ΔT : Kalibrasyondaki sıcaklık değişimi

K katsayısı, kuvvet ölçme cihazı üretici firmaları tarafından beyan edilen bir değer olup EN ISO 376 standardında bu katsayı $0,00027\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ alınmıştır.

Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_8 :

Bu bileşen sapma metodu ile belirlenir, enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (22) numaralı eşitlik ile hesaplanır:

$$w_8 = 100 \cdot \left| \frac{\bar{x}_r - x_a}{x_a} \right| = f_c \quad (22)$$

Birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesabı, w_c :

Bağıl değerler kullanılarak birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliği yukarıdaki bölümde verilen (12) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (12)$$

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü ($k=2,0$) alınır, bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (13) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$W = k \times w_c \quad (13)$$

Kuvvet biriminde belirsizlik ise aşağıdaki (14) numaralı eşitlik ile hesaplanır;

$$U = W \times F \quad (14)$$

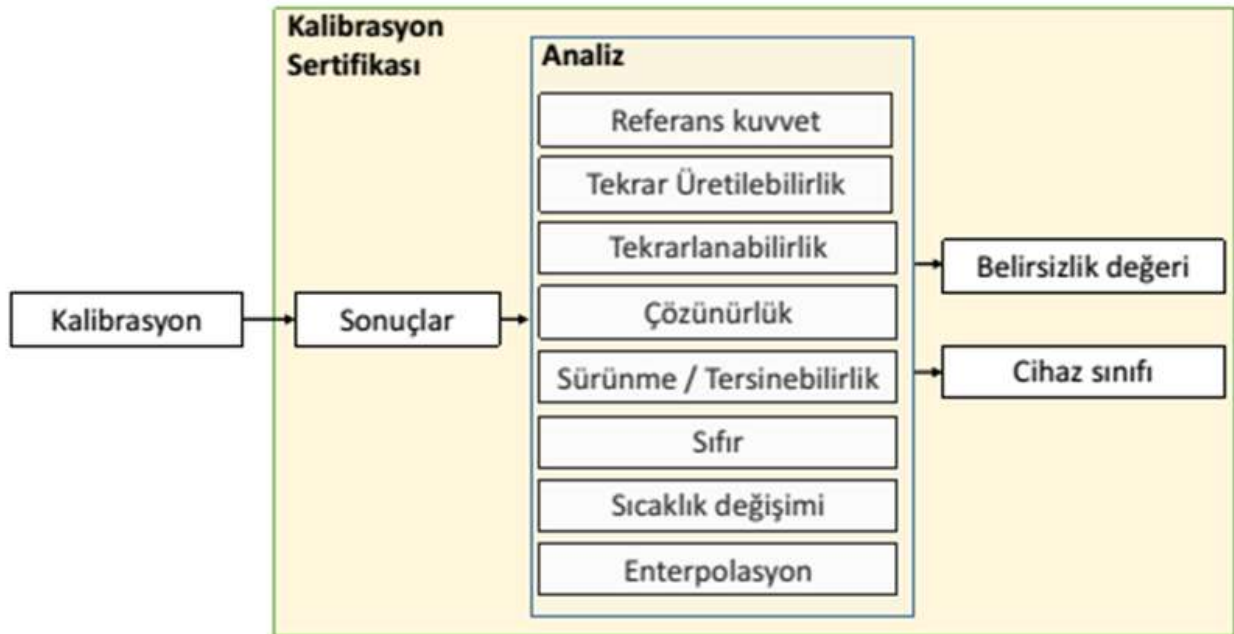
Belirsizliğin Raporlanması

Kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 376 standardına göre gerçekleştirilen kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır. Hesaplanan belirsizlik değerleri ölçüm aralığına göre sertifikada raporlanır. Ölçüm aralığı, aksi belirtilmediği sürece genel olarak kuvvet ölçme cihazının maksimum kuvvet kapasitesi (F_N) değerinin % 20'si ile % 100'ü arasındaki bölgeyi kapsar. Ölçüm aralığı belirlendikten sonra bu bölgedeki en büyük belirsizlik değeri cihazın belirsizliği olarak beyan edilir. EURAMET CG-04, "Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik" rehber dokümanında kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan her bir bağıl belirsizlik ($w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_8$)

bileşeninin ve kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunun yapılabileceği kuvvet standardı makinasının bağıl genişletilmiş ölçüm belirsizliği değerlerinin üst sınırlarının, EN ISO 376 standardının beyanı olan sınıflara göre değişimi aşağıda Tablo 4.5'te verilmiştir [4,5]. EN ISO 376 standardına göre kalibrasyon çıktılarının prensip şekli de Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna etki eden bağıl belirsizlik bileşenlerinin üst sınırının, EN ISO 376 standardının beyanı olan sınıflara göre değişimi

Sınıfı	W ₁ (%)	W ₂ (%)	W ₃ (%)	W ₄ (%)	W ₅ (%)	W ₆ (%)	W ₇ (%)	W ₈ (%)	Bağıl Genişletilmiş Belirsizlik
00	0,005	0,017	0,014	0,010	0,014	0,012	0,000	0,025	0,08
0,5	0,010	0,033	0,029	0,020	0,029	0,025	0,000	0,050	0,16
1	0,025	0,067	0,058	0,041	0,058	0,050	0,000	0,100	0,32
2	0,050	0,133	0,115	0,082	0,115	0,100	0,000	0,200	0,64



Şekil 4.3. EN ISO 376 standardına göre kalibrasyon çıktılarının prensip şekli

4.4. EN ISO 376'a Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

Kuvvet ölçme cihazının, EN ISO 376 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 4.6'da verilmiştir [1].

Tablo 4.6. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Ön Yüklemeler	1. Seri Öncesi			Sürünme Testi*	3. Seri Öncesi	5. Seri Öncesi
F/kN	1.1/(mV/V)	1.2/(mV/V)	1.3/(mV/V)	i_{30} ve i_{300} I/(mV/V)	3.1/(mV/V)	5.1/(mV/V)
Yüksüz (0)	0,00000	0,00000	0,00000	0,01942	0,00000	0,00000
Mak.Yük (20)	2,00205	2,00191	2,00192	2,00192	2,00191	2,00225
Yüksüz (0)	0,00022	-0,00001	0,00003	0,01930	-0,00005	0,00022

* 3. ön yüklemenin 60 s uygulanması sonrasında yüksüz durumda alınmıştır.

Ölçüm Adımları	0° Konum		120° Konum		240° Konum	
	1. Seri	2. Seri	3. Seri	4. Seri	5. Seri	6. Seri
F/kN	i I/(mV/V)	i I/(mV/V)	i I/(mV/V)	i'/(mV/V)	i I/(mV/V)	i'/(mV/V)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004	0,00000	0,00004
2	0,20009	0,20013	0,20016	0,20020	0,20010	0,20017
4	0,40028	0,40027	0,40035	0,40039	0,40029	0,40033
6	0,60049	0,60046	0,60054	0,60063	0,60047	0,60062
8	0,80069	0,80067	0,80074	0,80084	0,80072	0,80086
10	1,00095	1,00092	1,00094	1,00107	1,00094	1,00109
12	1,20115	1,20114	1,20115	1,20132	1,20117	1,20125
14	1,40135	1,40136	1,40137	1,40156	1,40139	1,40147
16	1,60155	1,60155	1,60157	1,60174	1,60162	1,60168
18	1,80179	1,80177	1,80176	1,80189	1,80180	1,80186
20	2,00199	2,00197	2,00199	-.-	2,00205	-.-
0	0,00007	0,00008	-.-	-.-	-.-	-.-

Tablo 4.7.'de yer alan 4 kN kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, referans kuvveti uygulayan sistemin bağıl belirsizlik değeri (w_1), o cihazın sertifikasından alınır. Bu örnek için, TÜBİTAK UME Ölü Ağırlıklı Kuvvet Kalibrasyon Makinasının bağıl ölçüm belirsizliği % 0,002 ($k=2$ için) olarak alınmıştır.

Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_1), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$w_1 = \% 0,002 / 2 = \% 0,0010$ olarak bulunur.

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_2) hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri ($\bar{X}_r$), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{x}_r = \frac{x_1 + x_3 + x_5}{3} = \frac{0,40028 + 0,40035 + 0,40029}{3} = 0,40031$$

Daha sonra, tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_2) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_2 = 100 \cdot \frac{1}{|\bar{X}_r|} \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2}$$

$$w_2 = 100 \cdot \frac{1}{0,40031} \sqrt{\frac{1}{6} \cdot ((0,40028 - 0,40031)^2 + (0,40035 - 0,40031)^2 + (0,40029 - 0,40031)^2)}$$

$w_2 = \% 0,0055$ olarak bulunur.

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_3) hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz gösterge değerlerinin ortalama değeri ($\bar{X}_{wr}$), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{x}_{wr} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{0,40028 + 0,40027}{2} = 0,40028$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası değeri (b') aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$b' = \frac{|x_2 - x_1|}{\bar{x}_{wr}} \cdot 100 = \frac{|0,40027 - 0,40028|}{0,40028} \cdot 100 = 0,002 \%$$

Böylece, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_3) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_3 = \frac{b'}{\sqrt{3}} = \frac{0,002}{\sqrt{3}}$$

$w_3 = \% 0,0012$ olarak bulunur.

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_4) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_4 = 100 \cdot \frac{r}{\sqrt{6} \cdot \bar{X}_r} = 100 \cdot \frac{0,00001 \text{ mV/V}}{\sqrt{6} \cdot 0,40031 \text{ mV/V}}$$

$w_4 = \% 0,0010$ olarak bulunur.

Sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_5) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{x_N} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,01930 - 0,01942}{2,00192} \right| \cdot 100 = 0,006 \%$$

$$w_5 = \frac{c}{\sqrt{3}} = \frac{0,006}{\sqrt{3}}$$

$w_5 = \% 0,0035$ olarak bulunur.

Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_5) hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için bağıl tersinebilirlik hatası (v_1, v_2, v) ifadelerinin, aşağıdaki gibi hesaplanması gerekmektedir.

$$v_1 = \left| \frac{x_4' - x_3}{x_3} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,40039 - 0,40035}{0,40035} \right| \cdot 100 = 0,010 \%$$

$$v_2 = \left| \frac{x_6' - x_5}{x_5} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,40033 - 0,40029}{0,40029} \right| \cdot 100 = 0,010 \%$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{0,010 + 0,010}{2} = 0,010 \%$$

Bu kapsamda tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_5) hesabı için aşağıdaki işlemler yapılır;

$$w_5 = \frac{v}{3\sqrt{3}} = \frac{0,010}{3\sqrt{3}}$$

$w_5 = \% 0,0019$ olarak bulunur.

Bu durumda elimizde iki adet w_5 ölçüm belirsizliği bileşeni değerinden birisini hesaplamımıza dahil etmemiz gerekecektir. Standartta hangisinin tercih edileceği yönünde kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Herhangi birini kullanabilirsiniz. Bilindiği üzere, sınıflandırma tablosunda belirtilen farklı durumlar için farklı sınıflandırma kriterleri tanımlanmıştır. Her durum için sınıflandırma kriterlerinde dikkate alınan parametreleri hesaba katarak ayrı ayrı şekilde belirsizlik beyanı da mümkündür.

Bu bölümde, malzeme test makinalarında kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kuvvet standartları makinasıyla kalibrasyonunu esas alan EN ISO 376 standardının belirsizlik parametreleri örnekleme yöntemiyle detaylandırılmıştır. Eğer kullanıcı malzeme test makinalarının kalibrasyonunda artan ve azalan yönde kuvvet değerlerinde uygulamalar gerçekleştiriyorsa, belirsizlik modelinde tersinebilirlik bağıl belirsizlik bileşeninin kullanılması daha doğru olacaktır. Aksi durumda, belirsizlik bileşeninin değeri ne olursa olsun sürünme bağıl belirsizlik bileşeninin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada verilen örnek hesaplamada, (w_5) parametresi olarak tersinebilirlik bağıl belirsizlik değeri dikkate alınarak işlemlere devam edilmiştir.

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_6) hesabı için, sıfır değeri kayma hatasının maksimum ve minimumu hesaplanmalıdır. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler yapılır;

$$f_{0\max} = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100 = \frac{0,00008 - 0,00000}{2,00192} \cdot 100 = 0,004 \%$$

$$w_6 = f_{0\max}$$

$w_6 = \% 0,0040$ olarak bulunur.

Sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_7) için, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonundaki sıcaklık değişimi $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'yi aşmadığı ve K katsayısı da $0,00027 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ alındığında aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

$$w_7 = 100 \cdot \frac{K \cdot \Delta T}{2\sqrt{3}} = 100 \cdot \frac{0,00027 \cdot 0,2}{2\sqrt{3}}$$

$w_7 = \% 0,0016$ olarak bulunur.

Kaynaklarda [6] ve [7] numaralı dokümanlarda, hesaplama bulunmuş cihaz gösterge değerinin (X_a) ayrıntılı olarak matematiksel çıkarımı ifade edilmektedir. Bu örnekte (X_a) değeri için $0,400315 \text{ mV/V}$ kullanılarak enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_8) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_8 = 100 \cdot \left| \frac{\bar{x}_r - x_a}{x_a} \right| = 100 \cdot \left| \frac{0,400310 - 0,400315}{0,400310} \right|$$

$w_8 = \% 0,0021$ olarak bulunur.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak birleştirilmiş belirsizlik aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2}$$

$$= \sqrt{0,0010^2 + 0,0055^2 + 0,0012^2 + 0,0010^2 + 0,0019^2 + 0,0040^2 + 0,0016^2 + 0,0021^2}$$

$w_c = \% 0,0078$ olarak bulunur.

$\% 95$ güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$W = k \times w_c = 2 \cdot 0,0078 = 0,0155$$

$W = \% 0,016$ olarak alınır.

Kuvvet ölçme cihazının, EN ISO 376 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu (örnek hesabı) neticesinde bağıl belirsizlik bileşenleri, tahmini değer, olasılık dağılımı, duyarlılık katsayısı ve belirsizlik katkısı parametrelerinden oluşan bilgiler aşağıda Tablo 4.7’de özetlenmiştir.

Tablo 4.7. Kuvvet standardı makinasında kalibre edilen kuvvet ölçme cihazı örnek hesabı sonucundaki belirsizlik bileşenleri ve katkıları

Girdi Büyüklüğü			Belirsizlik Bileşeni				Duyarlılık Katsayısı c_i		Belirsizliğe Katkısı $u_i(x_i)$	
Sembol	Tanım	Tahmini Değeri x_i	Değeri	Olasılık Dağılımı	Çarpan	Standart Belirsizlik $u(x_i)$				
w_1	Referans kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	4,0 kN	0,0020 %	Normal dağılım	0,5	0,0010 %	1		0,0010 %	
w_2	Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0055 %	Standart sapma	1	0,0055 %	1		0,0055 %	
w_3	Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0020 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0012 %	1		0,0012 %	
w_4	Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0024 %	Üçgen dağılım	0,408	0,0010 %	1		0,0010 %	
w_5	Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0033 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0019 %	1		0,0019 %	
w_6	Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0040 %	Standart sapma	1	0,0040 %	1		0,0040 %	
w_7	Sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0028 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0016 %	1		0,0016 %	
w_8	Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0021 %	Standart sapma	1	0,0021 %	1		0,0021 %	
F		4,0 kN				Bileşik Belirsizlik		w_c	0,0078 %	
						Genişletilmiş Belirsizlik		W	0,0155 %	
						Beyan Edilen Belirsizlik ($k=2$)		$w(y)$	0,016 %	
									4kN ± 0,016 %	

Kalibrasyon sertifikasında diğer basamaklarda benzer şekilde hesaplanmalı ve en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20’si ile % 100’ü arasında belirlenirse bu cihaz için 4 kN ile 20 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir.

Örneğin: 4 kN - 20 kN ölçüm aralığı için ± % 0,016 ölçüm belirsizliğidir.

4.5. ASTM E74'e Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu

Bu bölümde ASTM E74'e göre kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonları ISO 376 ile ASTM E74 standartlarının karşılaştırılması ile verilmiştir. Farklılıklar aşağıda maddeler halinde belirtilmektedir.

Kuvvet Değerlerinin Seçimi

ASTM E74 en az 30 kuvvet noktası seçilmesini ve her birinin yaklaşık % 10 aralıklı olarak kuvvet noktalarının 3 seri uygulanmasını tarif eder. Sınıf A veya Sınıf AA için ilk kuvvet adımının en düşük değerinin, Sınıf A için çözünürlüğün en az 400 katı ve Sınıf AA için çözünürlüğün en az 2000 katı olması gerekliliği verilmiştir.

ISO 376 standardı, en az 8 farklı kuvvet noktasının seçilmesini ve bunların en az 4 seri artan yönde kuvvet uygulanmasını ve bir de sürünme testini tanımlar. Bununla birlikte, kuvvet ölçüm cihazı hem artan hem de azalan yükleme için kullanılacaksa, 2 seri daha veri alınmasını ve toplam 6 seri ölçüm tarif edilmiştir. ISO 376, ilk kuvvet noktasının ölçümün % 2'sinden daha az olmasına izin vermez ve ilk nokta belirlenirken sınıflandırmaya göre değişim gösterir. Bu durum, Sınıf 00 için çözünürlüğün 4000 katı, Sınıf 0.5 için 2000 katı, Sınıf 1 için 1000 katı ve Sınıf 2 için çözünürlüğün 500 katı olarak belirlenir.

Sürünme Testleri

ASTM E74'e göre kuvvet ölçme cihazlarının sürünme ve sürünme toparlanma özelliği, genellikle kuvvet ölçme cihazı aşırı yüklenmediği, nem veya başka kirlenici etkilere maruz kalmadığı ve yorulma yetmezliği yaşadığı sürece sabittir. Sürünme testi, yeni kuvvet ölçme cihazları, büyük onarım gören kuvvet ölçüm cihazları ve aşırı yüklendiğinden şüphelenilen kuvvet ölçme cihazlarına ya da kalibrasyondan sonra sıfıra geri dönüşü kötü olan cihazlar için yapılır.

ASTM E74'e göre cihazın sapma değerlerini belirlemek için Metot A seçilirse, standardın madde 8.2'ye göre bir sürünme geri kazanım testi gerekir.

Sürünme geri kazanım testi şu şekilde yapılır: Kuvveti ölçme cihazının kalibrasyonunda en az iki kez maksimum kuvvet uygulanır ve 5 dakika boyunca mümkün olduğunca sabit tutulur. Uygulanan kuvvet mümkün olduğunca çabuk kaldırılır ve gösterge değeri 30 saniye ve 5 dakika sonra kaydedilir. Sürünme geri kazanım hatası aşağıdaki gibi hesaplanır:

Sürünme geri kazanım hatası, % = $100 \times (\text{Uygulanan kuvvet kaldırıldıktan 30 saniye sonraki gösterge değeri} - \text{İlk sıfırdaki gösterge değeri}) / \text{Maksimum Uygulanan Kuvvetteki gösterge değeri}$
Sıfır dönüş hatası da hesaplanması gereklidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır. Ayrıca sıfır dönüş hatası, sürünme geri kazanım hata limitlerinin % 50'sini aşıyorsa, sürünme testi tekrarlanmalıdır.
Sıfır Dönüş Hatası, % = $100 \times (\text{İlk sıfırdaki gösterge değeri} - \text{Uygulanan kuvvet kaldırıldıktan 5 dakika sonraki gösterge değeri}) / \text{Maksimum Uygulanan Kuvvetteki gösterge değeri}$.

ASTM E74 standardına göre, kuvvet ölçüm cihazları için, uygulanan kuvvetteki sürünme geri kazanım hata sınırları aşağıdaki şekildedir.

AA sınıfı için +/- % 0,020

A sınıfı için +/- % 0,050

ISO 376 ise kuvvet ölçme cihazına yalnızca artan yönde kuvvet uygulanırsa bir sürünme testi gereklidir. Sürünme testi kalibrasyon prosedürü sırasında ön yükleme yapıldıktan sonra herhangi bir zamanda yapılabilir. Ancak, sürünme testi sıfır kuvvette ölçülecekse, maksimum kuvvet en az 60 saniye uygulanmalıdır. Sürünme testi için cihaza maksimum kuvvet uygulandıktan veya kaldırıldıktan 30 s sonrası ve 300 s sonrası cihazın gösterge değerleri kaydedilir. Bağlı sürünme hatası, maksimum kuvvet uygulandıktan veya kaldırıldıktan 30 s sonrası ve 300 s sonrası alınan değerlerin ortalama maksimum kuvvet değerine oranıdır. Formülü aşağıdaki şekildedir.

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{x_N} \right| \cdot 100$$

ISO 376'a göre sürünme testi uygulandığında, kalibrasyon sertifikasında sürünme testi ölçümü yöntemi (maksimum kuvvette veya kuvveti kaldırdıktan sonra sürünme), sürünme ölçümünün ne zaman yapıldığı (ön yüklemenden sonra veya son ölçüm serisinden sonra, vb.), kuvvetin uygulandığı süresi (sıfır kuvvette sürünme ölçümü için) bilgileri belirtilmesi gerekliliği tanımlanmıştır.

Kuvvetlerin uygulanması için zaman gereksinimleri

ASTM E74, kuvvetin uygulanmasında gereken belirli bir zaman süresine atıfta bulunmaz. Ancak ISO 376 madde 7.4.3'te ise "Ardışık iki kuvvet arasındaki zaman aralığı mümkün olduğu kadar eşit olmalı ve kuvvet değişiminin başlamasından sonraki 30 saniye içinde okuma yapılmamalıdır" şeklinde bir ifade verilmiştir.

Sapmanın belirlenmesi

ASTM E74'e göre sapma hesaplaması için 2 metot tanımlanmıştır. İlki olan Metot A da, sadece ilk sıfır değerini dikkate alır, diğeri Metot B ise bir kuvvet veya kuvvet serisinin uygulanmasından önce ve sonra alınan değerlerin ortalamasından veya interpolasyonundan elde edilen bir sıfır değeri kullanılır. Kuvvet ölçme cihazının öngörülen kullanımına uygun olarak sıfır değeri için uygun metot seçilmelidir. Metot A için, sapma değeri, uygulanan kuvvetteki sapma ile sıfır kuvvetteki ilk sapma arasındaki farktan hesaplanır. Metot B'de ise, uygulanan her kuvvetten sonra sıfıra dönülmesi seçildiğinde, iki sıfır değerinin ortalaması veya interpolasyonu sapmayı belirlemek için kullanılır.

ISO 376'a göre sapma, kuvvet altında alınan gösterge değeri ile sıfır kuvvet değerindeki gösterge değerleri arasındaki fark olarak tanımlanır.

Eğri denkleminin belirlenmesi

ASTM E74 standardı kapsamında elde edilen gösterge değerlerine göre bir eğri denklemi uydurulur. Çoğu zaman ikinci derece bir denklem kullanılır. Ancak cihazın çözünürlüğünün 1 / 50.000'den fazla olduğunun da ve Ek A1'de tanımlanan F testini geçtiğinde 5. dereceye kadar bir eğri denklemi verilebilir. ISO 376'a göre ise yalnızca üçüncü dereceye kadar eğri denkleminin kullanımına izin verilir.

Hesaplanmalar ve verilerin analizi

Bu kısımda önemli farklılıklar verilecektir. ASTM E74, kalibrasyonda alınan değerler ile kalibrasyon denkleminde elde edilen değerler arasındaki farktan standart sapma aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$s_m = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{n - m - 1}} \quad (15)$$

Burada,

$d_1, d_2, \dots, d_n$: kalibrasyonda alınan n adet değerler ile kalibrasyon denkleminde elde edilen değerler arasındaki farklar

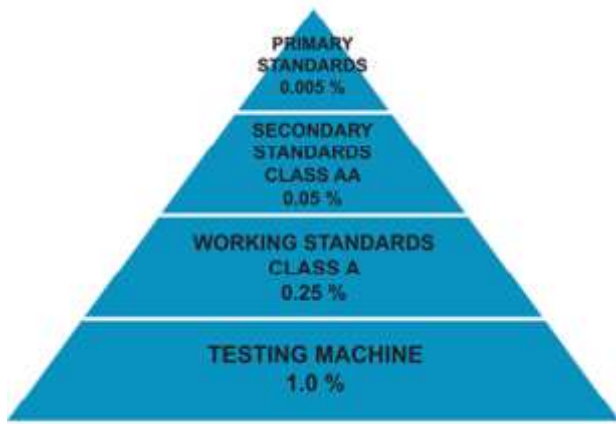
n : sapma değerleri sayısı

m : eğri denkleminin değerini ifade eder.

Hesaplanan bu değer (s_m), daha sonra uygun kuvvet birimine dönüştürülür ve 2,4 değeri ile çarpılır. Çarpılan değere Alt Sınır Faktörü veya LLF denir.

$$LLF = s_m \times 2,4 \quad (16)$$

Ölçüm veya yükleme aralığı bu kritere göre tanımlanır. ASTM E74'e göre ölçüm aralığı AA sınıfı için, LLF'nin 2000 ile çarpılmasıyla atanır. A sınıfı için ise LLF'nin 400 ile çarpılmasıyla belirlenir. ASTM E74'e göre doğruluk oranları piramidi Şekil 4.4'de verilmiştir. Buna göre, ölü ağırlıklı birincil standartlar, AA sınıfı ikincil standartlardan bir kuvvet ölçme sensörüne göre en az on kat daha doğru olduğu kavramı standartta verilmiştir. Sınıf AA standartları, Sınıf A standartlarından ise en az beş kat daha doğrudur ve Sınıf A standartları ise % 1 lik bir test makinasından dört kat daha doğrudur.



Şekil 4.4. ASTM E74'e göre doğruluk oranları piramidi



Şekil 4.5. ISO 376'a göre uygulanan kalibrasyon kuvvetinin genişletilmiş belirsizlik değerleri

ASTM E74'te verilen Örnek 1'e göre, birincil kuvvet standartları kullanılarak kalibre edilmiş bir kuvvet ölçme cihazının LLF'si 16 N (3.7 lbf) olarak hesaplanmış olsun.

AA sınıfı bir kuvvet ölçme cihazı olarak kullanmak için alt kuvvet sınırı (LLF),

$16 \times 2000 = 32\,000\text{ N}$ ($3.7 \times 2000 = 7400\text{ lbf}$) şekilde bulunur.

LLF, bu alt kuvvet sınırından daha büyük kuvvetler için cihazın kapasitesine göre nominal kuvvetin % 0.05'inden daha az olacaktır. Alt kuvvet sınırının, cihazın kapasitesinin % 2'sinden (1/50) daha az olmaması önerilir.

ASTM E74'te verilen Örnek 2'e göre ise A Sınıfı bir kuvvet ölçme cihazı olarak kullanmak için alt kuvvet sınırı (LLF),

$16 \times 400 = 6400\text{ N}$ ($3.7 \times 400 = 1480\text{ lbf}$) şekilde bulunur.

LLF, bu alt kuvvet sınırından daha büyük kuvvetler için cihazın kapasitesine göre nominal kuvvetin % 0.25'inden daha az olacaktır.

ISO 376'a göre kuvvet ölçme cihazının belirli özellikleri kalibrasyon sırasında alınan değerlerden belirlenir ve cihazın performansı belirli özelliklere göre derecelendirir. ISO 376'a göre kuvvet ölçme cihazının ilgili bağıl hataları belirleyebilmek için ya dört seri ölçüm ve bir sürünme testi ya da altı seri ölçüm verisi kullanılır. Her parametre kuvvet noktalarına göre en yüksek hata yüzdeleri belirlenir ve bir önceki kısımda Tablo 4.4 de verilen tablo ile kıyaslanarak en yüksek hata değeri için bir sınıf belirlenir. Sınıf belirlemede kullanılan hata parametrelerine göre farklı durumlar için sınıflandırma yapılabilir. Durumlara göre hata parametreleri Tablo 3'de verilmiştir. Kuvvet ölçme cihazlarının sınıflandırmasında yalnızca artan veriler kullanıldığında (dört seri ölçüm) tekrarlanabilirlik, tekrar üretilebilirlik, çözünürlük, enterpolasyon, sıfır ve sürünme açısından değerlendirilir.

Bununla birlikte, artan ve azalan veriler kullanıldığında ise (altı seri ölçüm) tekrarlanabilirlik, tekrar üretilebilirlik, çözünürlük, enterpolasyon, sıfır ve tersinebilirlik açısından değerlendirilir. Uygulanan kalibrasyon kuvvetinin genişletilmiş bağıl belirsizliği de tablonun izin verdiği değere eşit veya daha az olmalıdır. Bir kuvvet ölçme cihazının hata parametrelerinden biri Sınıf 00 için gerekli olan daha fazla bir hataya sahip, ancak diğer tüm parametreler ise Sınıf 00 kriterlerini karşılıyorsa, cihazın sınıfı en yüksek hatanın belirlediği olarak alınır. Eğer bağıl tersinebilirlik hatası Sınıf 1, ancak diğer tüm kriterler Sınıf 00'a uyuyorsa, uygulanan kalibrasyon kuvvetinin genişletilmiş belirsizliğinin de kriterleri karşıladığı varsayılırsa, cihaz Sınıf 1 olarak derecelendirilir.

Uygulanan kalibrasyon kuvvetinin standart içindeki belirsizliğini hesaba katması ISO 376'nın çok iyi yaptığı iştir. Bir kuvvet ölçme cihazı, Şekil 4.5'de gösterildiği gibi, kalibrasyon için kullanılan referanstan daha küçük bir belirsizliğe sahip olamaz. ASTM E74 ise, şu anda referans standardının belirsizliğinden daha düşük olabilecek bir Alt Sınır Faktörüne izin vermektedir.

Eurament cg-04 bölüm 6.2'de yer alan not şu şekildedir ASTM E74 standardında, kuvvet dönüştürücünün belirsizlik değerinin hesaplanması ve kalibrasyon kuvvetlerinin hatasının istatistiksel tahmini için cihazın enterpolasyon denkleminin kullanımı zorunlu kılınmaktadır.

Bu standarttaki belirsizlik hesaplaması, sadece tekrar üretilebilirlik ve enterpolasyon denkleminin sapma nedeniyle yapılan katkıları içerir, ancak orijinal değer daha düşük olarak hesaplanırsa değer çözünürlüğe eşit olarak arttırılır ve belirli sınırlar ile uygulanan kalibrasyon kuvvetinin belirsizliği de içindedir. Yöntem, kalibrasyon kuvvetlerinin ölçüm aralığında uygulanabilen ve iki standart kuvvet aralığı için alt kuvvet sınırlarını belirlemek için kullanılan kuvvet birimlerinde belirsizlik değeri verir. (AA Sınıfı için belirsizliğin 2 000 katı ve A Sınıfı için belirsizliğin 400 katı). Bu yöntemle hesaplanan belirsizlik, Eurament cg-04 bölüm 6.1'de yer alan bileşenlerin bir kısmını görmezden gelir ve bu nedenle farklı ve muhtemelen daha düşük belirsizlik değerleri elde edilebilir. Kuvvet ölçüm cihazının daha sonraki kullanımı için bir belirsizlik bütçesi oluşturulurken, sadece kalibrasyonla ilişkili hesaplanmış belirsizlik değerinin kullanımından kaçınılmalıdır (yani, kalibrasyon sırasında mevcut olan diğer belirsizlik bileşenlerinin katkıları da bütçeye katılmalıdır). Kuvvet ölçümlerinin belirsizliği hakkında daha fazla bilgi için Euramet cg-04 inceleyebilirsiniz.

Yeniden kalibrasyon tarihleri

ASTM E74'te Bölüm 11 yeniden kalibrasyon aralıklarıyla ilgilidir. İşleri basitleştirmek için, kuvvet ölçüm cihazı Sınıf AA aralığında % 0,032'ye eşit yada daha iyi veya Sınıf A aralığında % 0,16 gösteriyorsa, iki yıllık bir kalibrasyon aralığı verilebilir. Bölüm 11.2.2'de, eğer bu kriter sağlanamazsa, Bölüm 11.2.1'in stabilite kriterlerini karşılamayan cihazların, yeniden kalibrasyon

aralığı boyunca stabilite kriterlerinin aşılmamasını sağlayacak aralıklarla yeniden kalibre edileceğini belirtir.

ISO 376 standardı Bölüm 8.3.2'de, kalibrasyon sertifikasının geçerliliğinin 26 ayı geçmemesi gerektiğini belirtir.

Raporlama Kriteri

ASTM E74 standardının Bölüm 13'de raporda olması gerekenler şu şekilde verilmiştir.

Kalibrasyon laboratuvarı tarafından bir kuvvet ölçüm cihazının kalibrasyonu hakkında yayınlanan rapor hatasız olmalı ve tarih, veri vb. değişiklik içermemelidir. Raporda aşağıdaki bilgiler yer almalıdır.

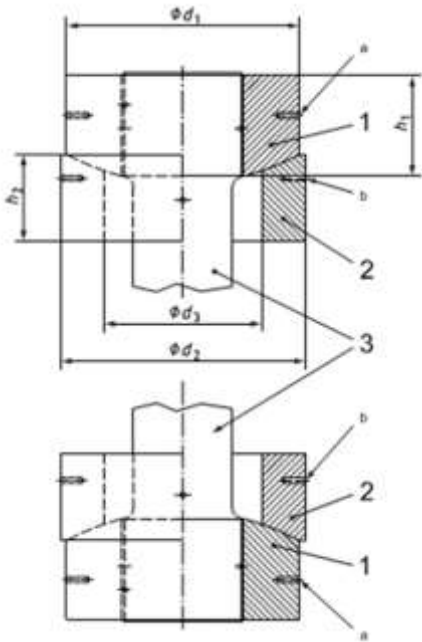
- Kalibrasyonun ASTM E74 standardının en son yayınlanan sayısına göre yapıldığına dair beyan,
- Kalibre edilmiş cihazın belirleyici seri numaraları ve üreticisi,
- Kalibrasyonu gerçekleştiren laboratuvarın adı,
- Kalibrasyon tarihi,
- Kalibrasyonda kullanılan referans standart tipini sınırlayıcı hatalar veya belirsizliği,
- Kalibrasyonda referans alınan sıcaklık,
- İlk ve geri dönüş sıfır kuvvetleri ve her bir dönme konumunda ölçülen sapmalar dahil olarak uygulanan kalibrasyon kuvvetleri ve karşılık gelen sapmaların listelenmesi.
- Sapmalarını hesabında kullanılan sıfırın belirlenmesi yöntemi (ASTM E74 bölüm 8.1'e göre (a) veya (b)), ve eğer sıfır belirlenmesinde metod (b) seçilirse, sıfırın ortalama veya enterpolasyonlu yöntem ile belirlenmesi durumu,
- Uygun kalibrasyon denklemi için katsayıların listesi ve deneysel verilerin uygun kalibrasyon eğrisinden sapmaları,
- Kuvvet ölçme cihazının çözünürlüğü, kalibrasyon sonuçlarıyla ilişkili ölçüm belirsizliği ve doğrulanmış kuvvet aralıkları,
- Eğer uygulandıysa, sürünme kurtarma testinin sonucu,
- Biliniyorsa, kalibrasyon için kullanılan besleme gerilimi ve dalga formu,
- Bu raporda ifade edilen alt kuvvet sınırının sadece kuvveti belirlemek için kalibrasyon denklemi kullanıldığında uygulandığına dair beyan,
- Kalibrasyon sırasında uygulanan her bir kuvvet için uygun kalibrasyon denklemindeki değerlerin tablosu ve eğer varsa ve karşılaştırmaya uygunsa, son kalibrasyondan bu yana kalibre edilmiş değerlerdeki değişimin bir tablosu (yeni cihazlar dışında),
- Çalışma sırasında cihazın kullanımını kolaylaştırmak için kuvvetlerin çalışma tablosu veya nominal bir faktörden veya başka bir cihazdan bir düzeltme eğrisi,

ISO 376 standardı Bölüm 8.3'e göre ise raporda aşağıdaki gerekliliklerin olması tanımlanmıştır.

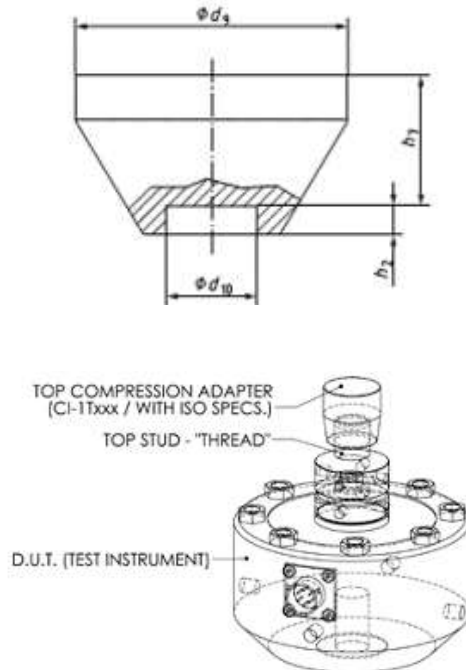
- Kuvvet ölçme cihazın ve yükleme aparatlarının ve kalibrasyon makinasının tüm elemanlarının tanımlanması,
- Kuvvet uygulama yönü (basma / çekme),
- Cihazın ön testlerin gerekliliklerine uygun olduğu,
- Cihazın sınıfı ve geçerli ölçüm aralığı (veya kuvvetleri) ve yükleme yönü (yalnızca artan veya artan /azalan),
- Kalibrasyonun tarihi, sonuçları ve gerektiğinde enterpolasyon denklemi,
- Kalibrasyonun yapıldığı sıcaklık,
- Kalibrasyon sonuçlarının belirsizliği (belirsizliği belirleme yöntemi ISO 376 Ek C'de verilmiştir) ve yapılmışsa, sürünme ölçümünün detayları.

Diğer Tanımlamalar

Hem ASTM E74 hem de ISO 376 zorunlu olmayan eklere sahiptir. ISO 376 standardının ekinde, basmada kullanılan bir kuvvet ölçme cihazı ile kalibrasyon makinası tablaları arasında bir etkileşim olmadığını doğrulamak için şiddetle tavsiye edilen yataklama başlığı testleriyle ilgilidir. ASTM E74 ekinde büyük bir hata kaynağı olabilecek bağlantı aparatlarına değinilmemektedir. ISO 376 Ek A 4'te, yükleme aparatları verilmiştir. Daha detaylı bilgi için bu bölümler incelenebilir. Yükleme aparatları, kuvvet uygulama hattını bozmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Çekme ve basma kuvvet ölçme cihazlarında kullanılabilen örnek bağlantı aparatları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



Şekil 4.5. ISO 376 Ek A 4 te verilen çekme yükleme aparatları



Şekil 4.6. ISO 376 Ek A 4 te verilen basma yükleme aparatları

4.6. ASTM E74'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Bu bölümde ASTM E74 standardının Ek X1, X2, X3 ve X4 bölümlerinde verilen bilgilere göre kuvvet ölçme cihazlarının belirsizlik hesabı detayları verilmiştir.

Birincil ve ikincil kuvvet kalibrasyonları için örnek belirsizlik analizleri

Malzeme test makinalarının kuvvet göstergelerini doğrulamak için kullanılan kuvvet ölçüm cihazlarının birincil ve ikincil kuvvet standartları için ölçüm belirsizliğinin belirlenmesine yardımcı olmak için örnek prosedürler ve hesaplamalar verilecektir. Sınıf AA doğrulanmış kuvvetler aralığı üzerinde kullanılan birincil kuvvet standartları ve Sınıf A doğrulanmış kuvvetler aralığında kullanılan ikincil kuvvet standartları, test makinalarının kuvvet göstergelerini doğrulamak için kullanılan kuvvet ölçüm cihazları ile ilgili ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi için örnekler verilmiştir. Ölçüm belirsizliğini NIST Teknik Not 1297 "NIST Ölçüm Sonuçlarının Belirsizliğini Değerlendirme ve İfade Etme Yönergeleri" yöntemine göre tahmin etmek için potansiyel belirsizlik kaynakları tanımlanır ve değerlendirilir. Uygun olduğunda başka analiz yöntemleri de kullanılabilir. Kullanıcı, kendi uygulaması ile ilgili tüm belirsizlik kaynaklarını belirlemeli ve analiz etmelidir. Belirsizlik kaynakları ve sunulan örnek hesaplamalar ve değerler sadece örneklerdir. Belirli bir kuvvet ölçüm cihazına ve kalibrasyon işlemine özgü tüm belirsizlik bileşenlerini içerdiği varsayılmamalıdır.

Ölçüm Belirsizliği Kaynakları

İlgili tüm belirsizlik kaynakları değerlendirilmelidir. Sunulan örneklerde kalibrasyon işlemi, aparat ve personel gibi belirsizlik kaynakları potansiyel olarak önemli belirsizlik değerleri içermeyebilir. Kullanıcı, kalibrasyon sonucu için önemli olan diğer belirsizlik kaynaklarını değerlendirmeli, tanımlamalı ve bunları ölçüm belirsizliği analizine dahil etmelidir.

ASTM E74 standardına göre 5 farklı belirsizlik hesaplama yaklaşımı verilmiştir. Bunlar :

- A. Birincil Kuvvet Standardının Uyguladığı Kuvvetin Belirsizliği
- B. İkincil Kuvvet Standartlarının Kalibrasyon Belirsizliği ve Test Cihazlarının Kuvvet Göstergesinin Birinci Kuvvet Standartlarına Göre Doğrulanması İçin Kullanılan Kuvvet Ölçüm Cihazları İçin Belirsizlik Hesabı
- C. İkincil Kuvvet Standartlarının Kalibrasyon Sırasında Uyguladığı Kuvvetin Belirsizliği
- D. Sınıf A ve Üzeri Onaylanmış Kuvvetler Üzerinden Test Makinalarının Kuvvet Ölçme Cihazlarını Kalibre Etmek İçin Kullanılan İkincil Kuvvet Standartlarının Kalibrasyon Belirsizliği
- E. Kuvvet Gösterge Cihazlarının Belirsizlik Değerinin Belirlenmesi İçin Örnek Prosedürler

Bu maddeler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

A. Birincil Kuvvet Standardının Uyguladığı Kuvvetin Belirsizliği

$$Force = \frac{M \cdot g}{9,80665} \left(1 - \frac{d}{D}\right)$$

M : ağırlığın kütlesi, kg

g : yerel yerçekimi ivmesi, m/s²

d : hava yoğunluğu (yaklaşık olarak 0,0012 Mg/m³)

D : ağırlığın yoğunluğu, d ile aynı birim

9,80665 : kuvvet birimi dönüşüm faktörü. SI birimleri için bu faktör kullanılmaz.

Bu formül dört bağımsız değişken içerir: ağırlığın kütlesi, ağırlıkların kullanıldığı yerel yerçekimi ivmesi, hava yoğunluğu ve ağırlığın yoğunluğudur. Ölçüm belirsizliği analizi, zaman içindeki değişimlerini dikkate alarak bu değişkenlerin belirsizliklerini içerir. Diğer bileşenler değerlendirilmeli ve uygun olduğunda ölçüm belirsizliğine dâhil edilmelidir.

Ağırlık kütlesinin belirsizliği: Ağırlık kütlesinin belirsizliği, normal olasılık dağılımına sahip bir Tip A belirsizliği olarak değerlendirilir ve u_w olarak adlandırılır. Örnek olarak, % 95 güven seviyesi ile % 0.0020'lik genişletilmiş belirsizlik için standart belirsizlik şöyle belirlenir:

$$u_w = \frac{0,0020 \%}{2} = 0,0010 \%$$

Yerel yerçekimi ivmesi tespitinin belirsizliği: Yerel yerçekimi ivmesi değeri 0.0001 m/s² içinde hesaplanır. Bu değer, Ulusal Jeodezik Bilgi Merkezi, Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi'nden (NOAA) elde edilebilir. Daha doğru bir belirleme için ağırlıkların kullanılacağı yerde yerçekimi ivmesi ölçülebilir. Gerçek ölçümle belirlendiğinde, ölçüm belirsizliğinin bu bileşeninin olasılık dağılımı normal olacaktır ve NOAA değeri kullanılırsa dağılım dikdörtgen olacaktır. Bu örnek için, yerel yerçekimi değeri % 95 güven düzeyi ile % 0.0001'lik bir belirsizlik ile yerel ölçümle elde edilmiştir. Bu Tip A belirsizliğidir ve dikdörtgen olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilir ve u_{g1} olarak adlandırılır. Standart belirsizlik şöyle belirlenir:

$$u_{g1} = \frac{0,0001 \%}{2} = 0,00005 \%$$

Ağırlık yığınının yüksekliği için yerçekimi düzeltmesinin belirsizliği: Yerçekimi alanı, referans düzlemin üstünde veya altında yükseklik ile değişir. Bu değişim yaklaşık % 0.000032 % / m'dir. Ağırlıkların üstünde veya altında kullanıldığında, referans düzleminde yerçekimi farkı değerlendirilmeli ve gerektiğinde ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasına dahil edilmelidir. Düzeltmeler tek tek ağırlıklara uygulanabilir veya belirsizlik analizine dahil edilebilir. Bu örnek için, ağırlık, yerçekiminin belirlendiği referans düzleminin 3 metre altındaki bir yükseklikte kullanılacaktır.

Bu B Tipi bir belirsizliktir ve dikdörtgen olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilir ve u_{g2} olarak adlandırılır. Standart belirsizlik:

$$u_{g2} = \frac{0,000032 \% \cdot 3}{\sqrt{3}} = 0,000055 \%$$

Kaldırma kuvvetinin değişmesi nedeniyle belirsizlik: Yer değiştiren havanın ağırlığına eşit kaldırma kuvvetleri standart ağırlıkların üzerine uygulanır. Bu kuvvet atmosferik basınç ve neme göre değişir. Düzeltme faktörü $(1 - d / D)$ olup, burada d = hava yoğunluğu ve D = ağırlık yoğunluğudur. Hava yoğunluğu denklemi NIST Özel Yayını 700-1'de bulunabilir. Aşağıda, hava yoğunluğundaki değişimlere bağlı belirsizlik katkısı ve ağırlıkların yapıldığı yoğunluk malzemesinin belirlenmesindeki belirsizlik örnekleri verilmiştir.

Hava yoğunluğunun belirsizliği: Hava yoğunluğu barometrik basınç, nem ve sıcaklıktaki dalgalanmalara göre değişir. 23 °C'lik sabit bir sıcaklıkta NBS Monografi 133'e göre, barometrik basınç ve nemdeki değişiklikler, gerçek hava yoğunluğunun belirli bir ortalama hava yoğunluğundan her iki yönde % 3'e kadar değişmesine neden olabilir. Kütlelerin 23 °C ± 2 °C'de bir ortamda tutulması durumunda, hava yoğunluğundaki değişiklik, kütlenin 5.47 ppm (% 0.000547) ağırlığında bir değişikliğe neden olacaktır. Bu Tip B belirsizliğidir ve dikdörtgen olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilir. Bu belirsizlik u_d olarak adlandırılır. Standart belirsizlik:

$$u_d = \frac{0,000547 \%}{\sqrt{3}} = 0,000316 \%$$

Ağırlıkların yapıldığı malzemelerin yoğunluğun belirlenmesindeki belirsizlik: Malzemenin yoğunluğu gerçek ölçüm ile belirlenebilir veya el kitabı değerleri kullanılabilir. Gerçek ölçümle belirlendiğinde, ölçüm belirsizliğinin bu bileşenin olasılık dağılımı normal olacaktır. El kitabı değerleri kullanıldığında belirsizlik dikdörtgen olasılık dağılımı olarak değerlendirilir. Bu örnek için, malzeme yoğunluğu, gerçek ölçümle, $k = 2$ için % 0.007'lik bir belirsizlik ile 7.903 g / cm³ olarak belirlenmiştir. Malzeme yoğunluğunda % 0.0035'lik bir değişiklik, uygulanan kuvvetin kütlesinde % 0.000007'lik bir değişikliğe neden olacaktır. Bu A Tipi bir belirsizliktir ve normal olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilir ve u_D olarak adlandırılır. Standart belirsizlik:

$$u_D = \frac{0,000007 \%}{2} = 0,0000035 \%$$

Kütle değerlerinin zamanla kararlılığına bağlı belirsizlik: Kütlelerin zamanla kararlılığı deneysel olarak belirlenebilir ve kütlelerin malzemesine ve işlenmesine bağlı olabilir. Ağırlıkların yüzey özellikleri, ağırlıkların tasarımı ve işleme makinasındaki işlemleri, çevresel etkiler, ağırlıkların bakımı ve korunması gibi diğer faktörler de kararlılığı etkileyebilir.

Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST)'nde ostenitik paslanmaz çelik alaşımından yapılan kütleler üzerinde yapılan çalışmalar, zamanla kütlelerde önemli bir değişiklik göstermediğini belirtmiştir. İngiltere'deki Ulusal Fizik Laboratuvarı (NPL), ostenitik paslanmaz çelik kütlelerle ilgili deneyimlerinde ise, kütlenin on yıllık bir süre boyunca 0,2 ppm'den daha iyi bir kararlılıkta olabileceğini belirtmiştir. Bu örnek için on yıl boyunca 0,2 ppm (% 0,00002) stabilite kullanılacaktır. Bu örnek için on yıllık bir kalibrasyon aralığı kullanılacaktır ve kütle değişiminin zamanla doğru orantılı olduğu varsayılacaktır. Bu B Tipi bir belirsizliktir ve dikdörtgen olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilir. Standart belirsizlik:

$$u_s = \frac{0,000002 \%}{\sqrt{3}} = 0,000012 \%$$

Yanlış hizalama nedeniyle belirsizlik: Yanlış hizalama, cihazın hassasiyetini etkileyen istenmeyen kuvvetlerin ve momentlerin uygulanmasına neden olabilir ve genellikle göz ardı edilen önemli bir hata kaynağıdır. Bu, hem çekme hem de basma yönlü kalibrasyonlarda ortaya çıkabilir. Hatanın değerlendirilmesi, farklı açısız yönelimler ve yönlerde gerçekleştirilen kalibrasyonlardaki farklılıklardan anlaşılabilir. Yük dizgisine kuvvet uygulandığına bakılmalı ve yük dizgisinin yük değişimlerinde yük eksenine dik hareketinde bozulup bozulmadığına bağlı olarak hizalamanın nispeten iyi olup olmadığı anlaşılabilir. Bu örnekte, dönme testinde belirlenen alt kuvvet limiti (LLF)'nin düşük olduğu ve bu hata kaynağının minimum olduğunu gösteren başka hiçbir belirti olmadığı varsayılmaktadır. Hizalamanın olması gerektiği gibi olmadığına dair işaretler varsa, çok eksenli kuvvet ölçüm cihazları veya ASTM E1012'de belirtildiği gibi hizalama örnekleri sorunun büyüklüğünü ölçmek için bir araç olabilir ve makinadaki ayarlama sonrasında uygun hizalamanın sağlandığını doğrulayabilir.

Birleşik ve Genişletilmiş Belirsizlik: Bu örnek için birleşik belirsizlik:

$$u_c = \sqrt{u_w^2 + u_{g1}^2 + u_{g2}^2 + u_d^2 + u_b^2 + u_s^2}$$

$$u_c = \sqrt{0,0010^2 + 0,00005^2 + 0,000055^2 + 0,000316^2 + 0,0000035^2 + 0,000012^2}$$

$u_c = 0,00105 \%$ olarak bulunur. Genişletilmiş belirsizlik değeri :

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 0,00105$$

U = % 0,0021 olarak hesaplanır.

Burada k kapsam faktörüdür. k = 2 kapsam faktörü için, gerçek kuvvet değerinin ölçülen $\pm U$ değeri aralığında olduğu güven seviyesi yaklaşık % 95'tir.

B. İkincil Kuvvet Standartlarının Kalibrasyon Belirsizliği ve Test Cihazlarının Kuvvet Göstergesinin Birinci Kuvvet Standartlarına Göre Doğrulanması için Kullanılan Kuvvet Ölçüm Cihazları için Belirsizlik Hesabı

Uygulanan kuvvetin belirsizliği: İkincil kuvvet standartlarının birincil kuvvet standartları kullanılarak kalibre edilmesi gerekmektedir. Diğer kuvvet ölçüm cihazları da birincil kuvvet standartlarına göre kalibre edilebilir. Birincil kuvvet standartlarına göre kalibre edildiğinde, bu ikincil kuvvet standartları ve diğer kuvvet ölçüm cihazları için ölçüm belirsizliği analizi, uygulanan kalibrasyon kuvvetinin belirsizliğini, tekrar gerçekleştirilebilirliğinin belirsizliğini, eğri uydurma hataları, sıcaklıktan kaynaklanan belirsizliği, yanlış hizalanmadan kaynaklanan belirsizliği içermelidir. Diğer bileşenler de değerlendirilmeli ve gerekli olduğunda ölçüm belirsizliğine ilave edilmelidir.

Test makinelerinin kuvvet göstergelerini birincil kuvvet standartlarına göre doğrulamak için kullanılan ikincil kuvvet standardının veya ölçme aletlerinin kalibrasyonu sırasında uygulanan kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliği: Kuvvet kalibrasyonu esnasında birincil kuvvet standartları tarafından uygulanan kalibrasyon kuvvetlerindeki belirsizlik değeri, yukarıda A bölümünde verilen birincil kalibrasyon örneği için, % 95 güven aralığı ile doğrulanmış kuvvet aralığının üzerinde % 0.0021'dir. Bu, normal olasılık fonksiyonuna sahip bir A Tipi belirsizliği olarak ele alınır. Standart belirsizlik:

$$u_{cal} = \frac{0,0021 \%}{2} = 0,00105 \%$$

Kalibrasyondaki tekrar üretilebilirlik ve eğri uydurma hataları sırasında kuvvet ölçüm cihazı yanıtlarına bağlı belirsizlik: Bu belirsizlik tekrar üretilebilirlikten kaynaklanan hataları (kuvvet ölçüm cihazının kalibrasyonu esnasında kalibrasyon makinası üzerinde yeniden konumlandırılması nedeniyle oluşan hataları ifade eder) ve kalibrasyon eğrisinin bir polinom tarafından mükemmel bir şekilde temsil edilmemesinin sonucu olan interpolasyon hatalarını içerir. Bu belirsizlik, LLF'nin (alt kuvvet limiti) oluşturulması için kullanılan eğri uydurma işleminde belirlenen standart sapma olarak değerlendirilir. Bu belirsizlik, normal olasılık dağılımına sahip bir A Tipi belirsizliği olarak ele alınır ve aralık üzerinde sabit kabul edilir. Ölçüm belirsizliği, ikincil kuvvet standardının kullanıldığı en düşük kalibrasyon kuvvetinde değerlendirilmelidir. Örnek olarak, bu belirsizlik maksimum kalibrasyon kuvvetinin % 0.0020'si ve ikincil kuvvet standardı aralığının % 10'unda kullanıldığında okumanın % 0.020'si olarak değerlendirilir. Maksimum kapasitenin %10'undaki okuma için değer:

$$u_r = \frac{0,0020 \%}{0,1} = 0,020 \% \text{ okuma}$$

Sıcaklığın hassasiyet ve sıfır kuvvet üzerindeki etkisine bağlı belirsizlik: Birincil laboratuvarında kuvvet standardının kalibre edildiği sıcaklıktan ikincil laboratuvarın kullandığı sıcaklık arasındaki farklılıklar, uygulanan kuvvette ilave belirsizliğe neden olur.

Bu örnek için, ikincil kuvvet standardı 0.0015 % /°C sıcaklık hassasiyet katsayısına ve 0.0015 % /°C sıfır sıcaklık katsayısına sahiptir. Ayrıca birincil laboratuvarların kalibrasyon raporunda kalibre edildiği sıcaklığı belirtilmesi gerekir.

Sıfırdaki sıcaklık etkisine bağlı belirsizlik genellikle küçüktür, çünkü sıcaklıkla oluşan sıfır kayması kalibrasyon çalışması için referans cihazdan gelir ve bir kalibrasyon çalışması sırasında sadece sıcaklığa bağlı sıfır kayması bunun sonucu olarak ortaya çıkar. Kalibrasyondan sonra sıfır geri dönüşünün izlenmesi, kalibrasyon işlemi sırasında sıfır değişimi için belirsizlik değerlendirmesi sağlar. Gözlenen sıfıra geri dönüş değerinde hem sürünme geri dönüş hatası hem de termal sıfır kayma ölçüm belirsizliği bileşenleri vardır. Sıfır kayması, seçilen sıfırın işleme yöntemine göre karar verilmelidir. Örneğin, başlangıç ve son sıfır verilerinin ortalaması alınan yöntem (b) kullanılması seçilirse, sıfır geri dönüş hatası uygun bir şekilde bu okumaların farkının yarısı olarak belirlenebilir. Yöntem (a) seçilirse, ilk ve son sıfır değerleri arasındakiki fark bir hata tahmini sağlar. Örneğin, kuvvet kaldırıldıktan 30 saniye sonra sıfır geri dönüş değeri, 2 mV/V hassasiyetli kuvvet ölçme cihazı için 0.00005 mV/V olarak ölçülür ve sapma hesaplaması için yöntem (b) kullanılması seçilir. Sıfıra dönüş belirsizliği, dikdörtgen dağılımlı Tip B belirsizliği olarak ele alınır. Standart belirsizlik:

$$u_z = \frac{(100 \cdot 0,00005 \text{ mV/V})}{2,00000 \text{ mV/V}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00072 \%$$

Maksimum kapasitenin %10'undaki okuma için değer:

$$u_z = \frac{0,00072 \%}{0,1} = 0,0072 \%$$

Yanlış eksenleme (hizalama) etkisine bağlı belirsizlik: Hizalama belirsizlik kaynaklarının değerlendirilmesi genellikle sorundur ve önemli hatalara yol açabilir. Değerlendirme yapılırken, kefe ve bağlantı elemanlarındaki yanlış hizalama ve bu yanlış hizalamanın ikincil kuvvet standardı ve kalibre edilen cihaz üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Yük eksenine dikey hareket için tüm sisteme (bağlantı elemanları, kalibre edilen cihaz ve ikincil kuvvet standardı) kuvvet uygulandığında eksenellik kontrolü her zaman yapılmalıdır. Eğer problem varsa harekete devam etmeden önce ayarlanmalıdır. Eşmerkezlilik ve açısal yanlış eksenellik belirsizliği, bağlantı elemanlarının toleranslarına ve yüzeylerinin düzlüğüne göre tahmin edilebilir. Bazı ikincil kuvvet standartlarında yan kuvvet ve moment nedeniyle belirlenmiş bir maksimum hata verilebilir veya bu deneysel olarak belirlenebilir. Bu belirsizlik, dönme testlerinde belirlenen hatalardan ayrılmaz ve ayrı olarak değerlendirilmez. Bu bölüm bilgi amaçlı ve ölçüm belirsizliğine önemli bir katkıda bulunabilecek konulara dikkat çekmesi amacıyla verilmiştir.

Birleşik ve Genişletilmiş Belirsizlik: Maksimum kapasitenin % 10'u için değerlendirilen bu örnek için birleşik belirsizlik:

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_r^2 + u_z^2}$$

$$u_c = \sqrt{0,00105^2 + 0,0200^2 + 0,0072^2}$$

$u_c = 0,0212$ % olarak bulunur. Genişletilmiş belirsizlik değeri :

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 0,0212$$

U = % 0,0424 olarak hesaplanır.

Burada k kapsam faktörüdür. k = 2 kapsam faktörü için, gerçek kuvvet değerinin ölçülen $\mp U$ değeri aralığında olduğu güven seviyesi yaklaşık % 95'tir.

Elektriksel Ölçümün Belirsizliği: Elektriksel ölçümün ölçüm belirsizliğini belirlemeye yönelik örnek bir yöntem sonraki bölümde verilmiştir. Kuvvet kalibrasyon cihazlarının gösterge cihazı bir sistem olarak kalibre edildiğinde, göstergenin kalibrasyon belirsizliği ve göstergenin doğrusallığı gibi faktörlerin kalibrasyon sürecinde dikkate alındığı ve çift sayılmaması gerektiği unutulmamalıdır. Kalibrasyon, birincil laboratuvar tarafından sağlanan cihazlar kullanılarak bir mV/V kalibrasyonuysa, elektriksel ölçüm belirsizliği kalibrasyon laboratuvarı tarafından rapor edilir ve kuvvet ölçüm cihazı için hesaplanan belirsizlikle birleştirilmelidir.

C. İkincil Kuvvet Standartlarının Kalibrasyon Sırasında Uyguladığı Kuvvetin Belirsizliği

Kalibrasyon sırasında Uygulanan Kuvvetin Belirsizliği: İkincil kuvvet standartları kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyonlar için uygulanan kuvvetlerin ölçüm belirsizliği analizi, ikincil kuvvet standardı birincil laboratuvarında kalibre edildiğinde uygulanan kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliğini, zamana bağlı kayma (stabilite) belirsizliğini, sıcaklıktan kaynaklanan belirsizliği, yanlış hizalamadan kaynaklanan belirsizliği ve kalibrasyon değerlerinin yayılmasındaki belirsizlik parametrelerini içermelidir. Diğer bileşenler de değerlendirilmeli ve gerekli olduğunda ölçüm belirsizliğine ilavel edilmelidir.

Kalibrasyon laboratuvarı tarafından raporlanan ikincil kuvvet standardının kalibrasyonu sırasında uygulanan kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliği: İkincil kuvvet standardının birincil kuvvet standartlarına göre kalibrasyonundaki belirsizlik, yukarıda A bölümünde verilen birincil kalibrasyon örneği için % 95 güven aralığı ile doğrulanmış kuvvet aralığının üzerinde % 0.0424'dür.

Bu, normal olasılık fonksiyonuna sahip bir A Tipi belirsizliği olarak ele alınır. Standart belirsizlik, nominal aralığın % 10'unda kullanımı için,

$$u_{cal} = \frac{0,0424 \%}{2} = 0,0212 \%$$

İkincil kuvvet standardının zamana bağlı kaymaya bağlı belirsizlik: İkincil kuvvet standardının zamanla bağlı kararlılığı, yeni bir ikincil kuvvet ölçme cihazı için deneyimlere ve kalibrasyon geçmişine sahip bir kuvvet ölçme cihazı için eski kalibrasyon verilerine dayanarak tahmin edilir. Yeni cihazlar için tahmin yaparken aynı malzemelerden yapılmış ve benzer şekilde imal edilmiş olması esas alınabilir. Üreticiler, zamana bağlı kaymayı kısmen laboratuvarın kontrollü ortama ve kullanıma bağlı olduğunu kabul ederek bir tahmin verebilirler. Kullanımda olan kuvvet ölçüm cihazları için, kararlılık, kuvvet ölçüm cihazının önceki kalibrasyonları ile mevcut kalibrasyonu karşılaştırılarak belirlenir. Bu örnekte, standardın zaman içindeki duyarlılığındaki değişimin bir yıllık yeniden kalibrasyon aralığı boyunca okunan değerin % 0.005'i olduğu varsayılmıştır. Bu belirsizlik, dikdörtgen olasılık fonksiyonuna sahip B Tipi belirsizlik olarak ele alınacaktır.

Standart belirsizlik değeri, maksimum kapasitenin %10'undaki okuma için:

$$u_s = \frac{0,005 \%}{\sqrt{3}} = 0,00289 \%$$

Birincil kuvvet standartları kalibrasyonundan ikincil kuvvet standartları kalibrasyonuna kalibrasyon değerlerinin aktarılmasındaki belirsizlik: Kalibrasyon değerlerinin aktarılmasındaki belirsizlik, kefenin ve birincil kuvvet standartları kalibrasyonunun ve ikincil kuvvet standardı kalibrasyonunun ölçüm sisteminin özelliklerindeki farklılıklarla ilgili belirsizliğin hesaba katılmasını içerir. Bu belirsizlik, biri referans standart değeri test edilen cihaz kullanılarak birincil kuvvet standartları ile kalibre edilen iki ikincil kuvvet standardının sonucu karşılaştırılarak tahmin edilebilir. Bu belirsizlik bileşenini tanımlamak için alternatif bir yaklaşım olarak, referans laboratuvarı olarak birincil kalibrasyon laboratuvarını kullanarak kalibrasyon kullanım aralığı boyunca bir yeterlilik testi yapmaktır.

Birincil kuvvet standartları ile kalibrasyondan elde edilen ölçülen değerlerin farkı ve ikincil kuvvet standartları ile kalibrasyonda belirlenen ölçülen değerler, kalibrasyon serisindeki her nokta için belirlenir. Ölçülen değerlerin maksimum kuvvetindeki sapma değeri 100 ile çarpılarak, okuma yüzdesi olarak aktarılma belirsizliğinin bir tahminidir. Bu örnek için, sonucun % 0.005 oranında okuma olduğunu varsayalım. Bu belirsizlik, dikdörtgen olasılık dağılımıyla Tip B belirsizliği olarak ele alınır.

$$u_d = \frac{0,005 \% \text{ okuma}}{\sqrt{3}} = 0,00289 \% \text{ okuma}$$

Sıcaklığın hassasiyet ve sıfır kuvvet üzerindeki etkisine bağlı belirsizlik: İkincil laboratuvarlarda kuvvet standardının kalibre edildiği sıcaklıktan ikincil laboratuvarın kullandığı sıcaklık arasındaki farklılıklar, uygulanan kuvvette ilave belirsizliğe neden olur. Sıfır üzerindeki sıcaklık etkisi yukarıda B kısmında değerlendirilmiştir. Mekanik kuvvet ölçme cihazları için, birincil kalibrasyon sırasında ASTM E74 Bölüm 9.1-9.4'teki gerekliliklerine göre bir referans sıcaklık düzeltmeleri yapılır ve referans sıcaklıkla ölçülen sıcaklık arasındaki farkını düzeltmesi için % 0.0270 %/°C sıcaklık hassasiyet katsayısı kullanılarak ek bir düzeltme de uygulanmalıdır. Bu örnek için, sıcaklık dengelemeli bir kuvvet ölçme cihazı olan ikincil kuvvet standardı 0.0015 % /°C sıcaklık hassasiyet katsayısına ve ikincil laboratuvar sıcaklığı ile ikincil kuvvet standardının birincil laboratuvar kalibrasyonu sırasında ölçülen sıcaklık farkının 2 °C'yi geçmediği varsayılmıştır. Belirsizlik, dikdörtgen dağılımlı Tip B belirsizliği olarak ele alınır. Standart belirsizlik :

$$u_t = \frac{0,0015 \% / ^\circ C \cdot 2 ^\circ C}{\sqrt{3}} = 0,00173 \% \text{ okuma}$$

Yanlış eksenleme (hizalama) etkisine bağlı belirsizlik: Hizalama belirsizlik kaynaklarının değerlendirilmesi, ikincil kuvvet kalibrasyonları için önemli bir hata kaynağı olabilir ve önemli hatalara yol açabilir. Değerlendirme yapılırken, kefe ve bağlantı elemanlarındaki yanlış hizalama ve bu yanlış hizalamanın ikincil kuvvet standardı ve kalibre edilen cihaz üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır.

Yük eksenine dikey hareket için tüm sisteme (bağlantı elemanları, kalibre edilen cihaz ve ikincil kuvvet standardı) kuvvet uygulandığında eksenellik kontrolü her zaman yapılmalıdır. Eğer problem varsa harekete devam etmeden önce ayarlanmalıdır. En iyi değerlendirme, ASTM E1012'de açıklanan yöntemleri kullanarak veya çok eksenli yük hücrelerini kullanan benzer yöntemleri kullanarak kefe ve yük eksenindeki yanlış hizalamayı fiziksel olarak ölçmektir. İyi hizalanmış bir kalibrasyon yük eksenini % 2'den daha az bir bükülme gösterebilir (lbf cinsinden ikincil kuvvet standardına lbf cinsinden eksenel kuvvetin bölündüğü moment $\times 100$). Eşmerkezlilik ve açısal yanlış hizalanma belirsizliği, bağlantı elemanlarının toleranslarına ve yüzeylerinin düzlüğüne göre tahmin edilebilir. Bazı ikincil kuvvet standartlarında yan kuvvet ve moment nedeniyle belirlenmiş bir maksimum hata verilebilir veya bu deneysel olarak belirlenebilir. Birlikte alınan bu bilgiler, yanlış hizalamadan kaynaklanan belirsizliği tahmin etmek için bir araçtır. Bu belirsizlik, dönme testlerinde belirlenen hatalardan ayrılamaz ve ayrı olarak değerlendirilmez.

Birleşik ve Genişletilmiş Belirsizlik: Maksimum kapasitenin % 10'u için değerlendirilen bu örnek için birleşik belirsizlik:

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_t^2}$$

$$u_c = \sqrt{0,0212^2 + 0,00289^2 + 0,00289^2 + 0,00173^2}$$

$u_c = 0,0216$ % olarak bulunur. Nominal kuvvetinin % 10 ila % 100'ü aralığında genişletilmiş belirsizlik değeri :

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 0,0216$$

U = % 0,0433 olarak hesaplanır.

Burada k kapsam faktörüdür. Nominal kuvvetinin % 10 ila % 100'ü aralığında, k = 2 kapsam faktörü için, gerçek kuvvet değerinin ölçülen $\pm U$ değeri aralığında olduğu güven seviyesi yaklaşık % 95'tir.

Elektriksel Ölçümün Belirsizliği: Elektriksel ölçümün ölçüm belirsizliğini belirlemeye yönelik örnek bir yöntem sonraki bölümde verilmiştir. Kuvvet kalibrasyon cihazlarının gösterge cihazı bir sistem olarak kalibre edildiğinde, göstergenin kalibrasyon belirsizliği ve göstergenin doğrusallığı gibi faktörlerin kalibrasyon sürecinde dikkate alındığı ve çift sayılmaması gerektiği unutulmamalıdır. Kalibrasyon, birincil laboratuvar tarafından sağlanan cihazlar kullanılarak bir mV/V kalibrasyonuysa, elektriksel ölçüm belirsizliği kalibrasyon laboratuvarı tarafından rapor edilir ve kuvvet ölçüm cihazı için hesaplanan belirsizlikle birleştirilmelidir.

D. Sınıf A ve üzeri Onaylanmış Kuvvetler Üzerinden Test Makinalarının Kuvvet Ölçme Cihazlarını Kalibre Etmek için Kullanılan İkincil Kuvvet Standartlarının Kalibrasyon Belirsizliği

İkincil kalibrasyon laboratuvarı tarafından kalibrasyon sırasında uygulanan kuvvetin belirsizliği: İkincil kuvvet standartları kullanılarak yapılan ölçüm belirsizliği analizi, ikincil kuvvet standardının birincil laboratuvar tarafından kalibre edildiğinde uygulanan kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliğini, eğri uydurma hataları, sıcaklıktan kaynaklanan belirsizliği, yanlış hizalanmadan kaynaklanan belirsizliği içermelidir. Diğer bileşenler de değerlendirilmeli ve gerekli olduğunda ölçüm belirsizliğine ilave edilmelidir.

Kalibrasyon laboratuvarı tarafından raporlanan ikincil kuvvet standardının kalibrasyonu sırasında uygulanan kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliği: İkincil kuvvet standardının birincil kuvvet standartlarına göre kalibrasyonundaki belirsizlik, yukarıda C bölümünde verilen birincil kalibrasyon örneği için.% 95 güven aralığı ile doğrulanmış kuvvet aralığının üzerinde % 0.0433'dür.

Bu, normal olasılık fonksiyonuna sahip bir A Tipi belirsizliği olarak ele alınır. Standart belirsizlik, nominal aralığın % 10'unda kullanımı için,

$$u_{cal} = \frac{0,0433 \%}{2} = 0,0217 \%$$

Kalibrasyondaki tekrar üretilebilirlik ve eğri uydurma hataları sırasında kuvvet ölçüm cihazı yanıtlarına bağlı belirsizlik: Bu belirsizlik tekrar üretilebilirlikten kaynaklanan hataları (kuvvet ölçüm cihazının kalibrasyonu esnasında kalibrasyon makinası üzerinde yeniden konumlandırılması nedeniyle oluşan hataları ifade eder) ve kalibrasyon eğrisinin bir polinom tarafından mükemmel bir şekilde temsil edilmemesinin sonucu olan interpolasyon hatalarını içerir. Bu belirsizlik, alt limit faktörünü oluşturmak için kullanılan eğri oturtma işleminde belirlenen standart sapma olarak değerlendirilir. Bu belirsizlik, LLF'nin (alt kuvvet limiti) oluşturulması için kullanılan eğri uydurma işleminde belirlenen standart sapma olarak değerlendirilir. Bu belirsizlik, normal olasılık dağılımına sahip bir A Tipi belirsizliği olarak ele alınır ve aralık üzerinde sabit kabul edilir. Ölçüm belirsizliği, ikincil kuvvet standardının kullanıldığı en düşük kalibrasyon kuvvetinde değerlendirilmelidir. Örnek olarak, bu belirsizlik maksimum kalibrasyon kuvvetinin % 0.004'ü ve ikincil kuvvet standardı aralığının % 10'unda kullanıldığında okumanın % 0.04'si olarak değerlendirilir. Maksimum kapasitenin %10'undaki okuma için değer:

$$u_r = \frac{0,0040 \%}{0,1} = 0,04 \% \text{ okuma}$$

Sıcaklığın hassasiyet ve sıfır kuvvet üzerindeki etkisine bağlı belirsizlik: Birincil laboratuvarında kuvvet standardının kalibre edildiği sıcaklıktan ikincil laboratuvarın kullandığı sıcaklık arasındaki farklılıklar, uygulanan kuvvette ilave belirsizliğe neden olur. Bu örnek için, ikincil kuvvet standardı 0.0015 % /°C sıcaklık hassasiyet katsayısına ve 0.0015 % /°C sıfır sıcaklık katsayısına sahiptir. Ayrıca birincil laboratuvarlar kalibrasyon raporunda kalibre edildiği sıcaklığı belirtilmesi gerekir. Sıfırdaki sıcaklık etkisine bağlı belirsizlik genellikle küçüktür, çünkü sıcaklıkla oluşan sıfır kayması kalibrasyon çalışması için referans cihazdan gelir ve bir kalibrasyon çalışması sırasında sadece sıcaklığa bağlı sıfır kayması bunun sonucu olarak ortaya çıkar. Kalibrasyondan sonra sıfır geri dönüşünün izlenmesi, kalibrasyon işlemi sırasında sıfır değişimi için belirsizlik değerlendirmesi sağlar. Gözlenen sıfıra geri dönüş değerinde hem sürünme geri dönüş hatası hem de termal sıfır kayma ölçüm belirsizliği bileşenleri vardır. Sıfır kayması, seçilen sıfırın işleme yöntemine göre karar verilmelidir. Örneğin, başlangıç ve son sıfır verilerinin ortalaması alınan yöntem (b) kullanılması seçilirse, sıfır geri dönüş hatası uygun bir şekilde bu okumaların farkının yarısı olarak belirlenebilir. Yöntem (a) seçilirse, ilk ve son sıfır değerleri arasındakiki fark bir hata tahmini sağlar.

Örneğin, kuvvet kaldırıldıktan 30 saniye sonra sıfır geri dönüş değeri, 2 mV/V hassasiyetli kuvvet ölçme cihazı için 0.00010 mV/V olarak ölçülür ve sapma hesaplaması için yöntem (b) kullanılması

seçilir. Sıfıra dönüş belirsizliği, dikdörtgen dağılımlı Tip B belirsizliği olarak ele alınır. Standart belirsizlik:

$$u_z = \frac{(100 \cdot 0,00010 \text{ mV/V})}{2,00000 \text{ mV/V}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00144 \%$$

Maksimum kapasitenin %10'undaki okuma için değer:

$$u_z = \frac{0,00144 \%}{0,1} = 0,0144 \%$$

Yanlış eksenleme (hizalama) etkisine bağlı belirsizlik: Bu belirsizlik kaynağı üstte verilen B ve C bölümlerinde detaylı olarak verilmiştir. Bu belirsizlik, dönme testlerinde ve kalibrasyon değerlerinin elde edilmesinde belirlenen hatalardan ayrılamaz ve ayrı olarak değerlendirilmelidir.

Birleşik ve Genişletilmiş Belirsizlik: Maksimum kapasitenin % 10'u için değerlendirilen bu örnek için birleşik belirsizlik:

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_r^2 + u_z^2}$$

$$u_c = \sqrt{0,00217^2 + 0,040^2 + 0,0144^2}$$

$u_c = 0,0477 \%$ olarak bulunur. Genişletilmiş belirsizlik değeri:

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 0,0477$$

U = % 0,0954 olarak hesaplanır.

Burada k kapsam faktörüdür. k = 2 kapsam faktörü için, gerçek kuvvet değerinin ölçülen $\mp U$ değeri aralığında olduğu güven seviyesi yaklaşık % 95'tir.

Elektriksel Ölçümün Belirsizliği: Elektriksel ölçümün ölçüm belirsizliğini belirlemeye yönelik örnek bir yöntem sonraki bölümde verilmiştir. Kuvvet kalibrasyon cihazlarının gösterge cihazı bir sistem olarak kalibre edildiğinde, göstergenin kalibrasyon belirsizliği ve göstergenin doğrusallığı gibi faktörlerin kalibrasyon sürecinde dikkate alındığı ve çift sayılmaması gerektiği unutulmamalıdır.

Kalibrasyon, birincil laboratuvar tarafından sağlanan cihazlar kullanılarak bir mV/V kalibrasyonuysa, elektriksel ölçüm belirsizliği kalibrasyon laboratuvarı tarafından rapor edilir ve kuvvet ölçüm cihazı için hesaplanan belirsizlikle birleştirilmelidir.

E. Kuvvet Gösterge Cihazlarının Belirsizlik Değerinin Belirlenmesi İçin Örnek Prosedürler
Bir dönüştürücü simülatörü kullanarak Sınıf A doğrulanmış kuvvet aralığı için kullanılan kuvvet ölçme cihazının elektronik gösterge sistemi için belirsizlik analizi (ASTM E74 yöntemine uygun ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi):

Kuvvet ölçme cihazının elektronik gösterge sisteminin bağlı olduğu kuvvet ölçüm cihazı, tam kapasitede 2 mV/V çıkışa sahiptir. Kuvvet ölçme cihazı, kuvvet dönüştürücü kapasitesinin % 10'una eşit bir alt kuvvet limiti (LLF) olan Sınıf A doğrulanmış kuvvet aralığında kullanılmak üzere kalibre edilmiştir. Sistemin LLF'si % 0.25'tir. Standart sapması ise % 0.104'tür.

Kuvvet ölçme sistemi için izin verilen standart belirsizliğin onda birine (1/10) eşit veya ondan daha düşük bir ölçüm belirsizliğine sahip bir dönüştürücü simülatör, gösterge ölçüm aralığı boyunca bir seri artan mV/V adımı sağlamak için kullanılır. Elektronik gösterge cihazı ve dönüştürücü simülatörü bağlantısı yapıldıktan sonra üreticinin önerilerine göre ısınmasına izin verilmelidir. Orijinal elektronik gösterge cihazı ve değiştirilecek elektronik gösterge cihazından her bir polarite için (+ veya - yönlü) 3 kez ve en az 5 okuma değerinde alınacaktır. Değerler, sistem için alt kuvvet sınırından daha düşük veya ona eşit bir nokta ve sistem için maksimum kuvvet değerine eşit veya daha yüksek bir nokta içermelidir. Dönüştürücü simülatörü ayarları, ölçüm aralığındaki her % 20 aralık için en az bir noktayı sağlamalıdır. Ayrıca, çevresel koşulların, alınan ölçümlerin doğruluğunu önemli ölçüde etkilememesine dikkat edilmelidir.

Her iki göstergenin okumalarını belirlemek için, aynı dönüştürücü simülatörünün kullanılması arzu edilir. Bununla birlikte, belirli çıkışlarının, kuvvet ölçüm cihazı için izin verilen standart belirsizliğin onda biri (1/10) için de aynı olması koşuluyla farklı simülatörler de kullanılabilir.

Yedek olarak kullanılacak elektronik kuvvet göstergesinin elektriksel özelliklerinin aynı olması için ara bağlantı kablusunun kablolama ve kablo tipleri, boyutları ve uzunlukları bakımından aynı olması ile değerlendirilir.

0.2 mV/V basamakları sağlayabilen bir dönüştürücü simülatörü seçilmelidir.

Dönüştürücü simülatörü orijinal kuvvet göstergesine bağlanır ve 0,2 mV/V' değerinde ve 0,4 mV/V ile 2,0 mV/V arasındaki her 0,4 mV/V basamaklarında değerler kaydedilir. İlk okumaların ardından ikinci ve üçüncü seri ölçüm yapılır. Bu işlem ters polarite için tekrarlanır. Bu işlem, geçici (ikame) olarak kullanılacak göstergede tekrarlanır.

Dönüştürücü simülatörünün kararlılığı, ölçüm belirsizliğinin belirlenmesinde ilgili süre boyunca değerlendirildiği takdirde, iki göstergenin doğrulamasının aynı anda yapılması gerekli değildir.

Elde edilen değerlerin doğrusal en küçük kareler eğrisi uyumu gerçekleştirilir. Bu örnek için, standart sapma 0.00005 mV/V olarak belirlenmiştir ve LLF değeri standart sapmanın 2.4 katı olacak şekilde 0.00012 mV/V' olarak belirlenir.

Bu değ er, elektrik ünitelerinde alt kuvvet sınırında sistemin LLF'sinin üçte birine (1/3) eşit veya daha d    k olmalıdır.

$(0,25 \% \times 0,2 \text{ mV/V}) / 3 = 0,000167 \text{ mV/V}$ olarak hesaplanır.

Sınıf A doğrulanmış kuvvet aralığı için kullanılan kuvvet  l me cihazının elektronik gösterge sistemi için belirsizlik analizi (NIST Teknik Not 1297 yöntemine uygun ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi): Bu bölümde NIST TN 1297 yöntemi için aynı örnek kullanılmıştır. Elektronik kuvvet göstergesinin bir ölçüm belirsizliği analizinde ilk adım hata kaynaklarını belirlemektir. Dirençli uzama  l  r tabanlı kuvvet ölçüm cihazı elektronik göstergelerinde potansiyel ölçüm hatası kaynakları şunlardır:

- Kalibrasyon belirsizliği (Kazanç Hatası)
- Doğrusallık hatası
- Sıfır kayması
- Sıcaklığın sıfır değeri üzerindeki etkisi
- Sıcaklık hassasiyet etkisi
- Kazanç ve Sıfır Kararlılığı
- Niceleme Hatası
- Ortak Mod Gerilimi
- Normal Mod Gerilimi
- G r  lt 
- Besleme gerilimi hatası
- Elektriksel Yükleme
- Besleme Voltaj Değişimi
- Termal EMF nedeniyle hata sinyalleri

Bu potansiyel hata kaynaklarının her biri ve diğer önem ta ıyanların her biri, göstergenin çalışacağı koşullar açısından değerlendirilmelidir. Gösterge performansını doğrulamak ve hatalarını belirlemek için bir d n   t r c  simülatörünün veya eşdeğer bir laboratuvar test cihazının kullanılması önerilir.  nceki örnekte verilen test noktalarının sayısı ve dağılımı için aynı şartlar geçerlidir.

Bir gösterge için belirlenen başlıca hata kaynaklarının tipik analizi aşağıda verilmiştir:

Simülatör belirsizliği	$u_c = 20 \text{ ppm}$	Oran belirsizliğini içerir
Gösterge doğrusallık hatası (doğrusal olmama)	$u_{nl} = 116 \text{ ppm}$	% 0.005 doğrusal olmama ve varsayılan bir dikdörtgen dağılım olasılığı için, $0.005 / 2\sqrt{3}$ olup, burada 2 faktörü belirli bir göstergeye özgüdür ve hatayı gösterge kullanımının tamamını yansıtacak şekilde test ederek belirlenmelidir. Doğrusal olmama, bir dönüştürücü simülatörü veya başka bir uygun cihaz kullanılarak test ile değerlendirilir.
Sıcaklığın kazanç üzerindeki etkisi	$u_t = 58 \text{ ppm}$	20 ppm / °C sıcaklık katsayısı ve $\pm 5 \text{ °C}$ sıcaklık aralığı ve varsayılan dikdörtgen dağılım olasılığı için $(5 \times 20) / \sqrt{3} = 58$
Kazanç Kararlılığı	İhmal edilebilir	Eğer ikame şekilde bir simülatörde kalibre edilmişse, dönüştürücü simülatörü belirsizliğine kazanç hatası dahil edildiği için, kazanç kararlılığı bir faktör değildir.
Gürültü	değerlendirilen	Gürültü, alt kuvvet sınırını belirleyen belirsizliğe zaten dahil edilmiştir. Gürültünün ayarlanması yalnızca yedek göstergenin sergilediği gürültü orijinal göstergeninkini aşarsa gereklidir. Niceleme hatası genellikle gürültüden daha küçüktür ve gürültünün deneysel tespitine dahil edilir. Her bir gösterge için gürültü test ile belirlenmelidir.

Diğer potansiyel kaynaklardan gelen hataların bu gösterge için ihmal edilebilir olduğu bulunmuştur (en büyük hata kaynağının 1/5'inden az). DC (doğru akım) göstergeler için, termal emf hata kaynağı önemli olabilir ve deneysel olarak değerlendirilmelidir.

Değerlendirilen hata kaynaklarına dayalı birleşik belirsizlik,

$$u_c = \sqrt{u_c^2 + u_{nl}^2 + u_t^2}$$

$$u_c = \sqrt{20^2 + 116^2 + 58^2}$$

$u_c = 131 \text{ ppm}$ olarak bulunur. Genişletilmiş belirsizlik değeri:

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 131$$

U = % 0,026 olarak 0,2 - 2,0 mV/V ölçüm alanındaki okumalar için hesaplanır.

mV / V birimlerinde ifade edilen belirsizlik, 0.2 mV/V seviyesinde 0.000052 mV/V'dir.

Burada k kapsam faktörüdür. k = 2 kapsam faktörüne bağlı olarak % 95 olasılıkla gerçek değer in içerileceği beklenen bir aralığı tanımlar.

Bu Sınıf A doğrulanmış kuvvet aralığı için izin verilen belirsizlik, 0.2 mV/V'nin % 0.25'i veya 0.0005 mV/V elektriksel birimlerde ifade edilir. Elektronik gösterge cihazı için izin verilen belirsizlik, bu sınırın 1/3'üne veya 0.000167 mV/V'ye eşit veya daha azdır. Bu örnekte olduğu gibi belirsizlik 0.000167 mV/V'den düşükse, gösterge değişikliğe izin verilebilir.

Sınıf AA doğrulanmış kuvvet aralığı için kullanılan kuvvet ölçme cihazının elektronik gösterge sistemi için belirsizlik analizi (NIST Teknik Not 1297 yöntemine uygun ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi): Üst bölümde verilen yöntemi takip ederek, % 10 daha düşük kuvvet sınırına ve maksimum kuvvette 2 mV/V hassasiyete sahip bir sistem için Sınıf AA doğrulanmış kuvvet aralığında kullanılmak üzere kalibre edilmiş bir elektronik gösterge cihazı için bir analiz yapılacaktır.

Simülatör belirsizliği	$u_c = 10 \text{ ppm}$	Oran belirsizliğini içerir
Gösterge doğrusallık hatası (doğrusal olmama)	$u_{nl} = 58 \text{ ppm}$	% 0.005 doğrusal olmama ve varsayılan bir dikdörtgen dağılım olasılığı için, $0,01 / 2\sqrt{3}$ olup, burada 2 faktörü belirli bir göstergeye özgüdür ve hata gösterge kullanımının tamamını yansıtacak şekilde test ederek belirlenmelidir.
Sıcaklığın kazanç üzerindeki etkisi	$u_t = 12 \text{ ppm}$	5 ppm / °C sıcaklık katsayısı ve $\pm 2 \text{ °C}$ sıcaklık aralığı ve varsayılan dikdörtgen dağılım olasılığı için $(2 \times 10) / \sqrt{3} = 12$

Diğer potansiyel kaynaklardan gelen hataların bu gösterge için ihmal edilebilir olduğu bulunmuştur (en büyük hata kaynağının 1/5'inden az).

Değerlendirilen hata kaynaklarına dayalı birleşik belirsizlik,

$$u_c = \sqrt{u_c^2 + u_{nl}^2 + u_t^2}$$

$$u_c = \sqrt{10^2 + 58^2 + 12^2}$$

$u_c = 60 \text{ ppm}$ olarak bulunur.

Geniştirilmiş belirsizlik değeri:

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 60$$

U = % 0,012 olarak 0,2 - 2,0 mV/V ölçüm alanındaki okumalar için hesaplanır.

mV / V birimlerinde ifade edilen belirsizlik, 0.2 mV/V seviyesinde 0.000024 mV/V'dir.

Burada k kapsam faktörüdür. k = 2 kapsam faktörüne bağlı olarak % 95 olasılıkla gerçek değer in içerileceği beklenen bir aralığı tanımlar.

Bu Sınıf AA doğrulanmış kuvvet aralığı için izin verilen belirsizlik, 0.2 mV/V'nin % 0.05'i veya 0.0001 mV/V elektriksel birimlerde ifade edilir. Kuvvet gösterge cihazı için izin verilen belirsizlik, bu sınırın 1/3'üne veya 0.000033 mV/V'ye eşittir. Bu örnekte olduğu gibi belirsizlik 0.000033 mV/V'den düşükse, gösterge değişikliğe izin verilebilir.

4.7. ASTM E74'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

Kuvvet ölçme cihazının, ASTM E74 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Uygulanan	Seri 1	Seri 2	Seri 3	Ortalama
lbf	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
100	-0,08264	-0,08265	-0,08268	-0,08266
500	-0,41328	-0,41331	-0,41333	-0,41331
1000	-0,82664	-0,82667	-0,82666	-0,82666
1500	-1,24008	-1,24007	-1,24012	-1,24009
2000	-1,65361	-1,65362	-1,65364	-1,65362
2500	-2,06722	-2,06727	-2,06729	-2,06726
3000	-2,48092	-2,48096	-2,48097	-2,48095
3500	-2,89473	-2,89467	-2,89472	-2,89471
4000	-3,30851	-3,30857	-3,30859	-3,30856
4500	-3,72245	-3,72249	-3,72250	-3,72248
5000	-4,13634	-4,13641	-4,13644	-4,13640

Tablo 4.6.'de yer alan 100 lbf kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri için de benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, referans kuvveti uygulayan sistemin bağıl belirsizlik değeri (u_w), o cihazın sertifikasından alınır. Bu örnek için, Kuvvet Kalibrasyon Makinasının bağıl ölçüm belirsizliği % 0,0016 ($k=2$ için) olarak alınmıştır.

Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin ölçüm belirsizliği bileşeni (u_w), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_w = \frac{U_w}{2} \cdot \frac{F}{100} = \frac{\% 0,0016}{2} \cdot \frac{1000 \text{ lbf}}{100}$$

$u_w = 0,0008 \text{ lbf}$ ($k = 1$) olarak bulunur.

Gösterge cihazının voltaj kalibrasyonu ölçüm belirsizlik değeri (u_v) kuvvet ölçüm sensörü ile gösterge sistemi kullanılarak bir sistem olarak birlikte kalibre edilmesi sebebiyle "0" sıfırdır.

$u_v = 0$

Tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği bileşeni (u_r) aşağıdaki gibi hesaplanır:

Çözünürlük değeri, $r = 0,00001 \text{ mV/V}$ olduğu verilmiştir. Çözünürlük hatası değeri ilk kuvvet basamağı olan 100 lbf değeri için lbf biriminde ifade edebilmek için,

$$r = 100 \cdot \frac{r}{F_1} = 100 \cdot \frac{-0,00001 \text{ mV/V}}{-0,08266 \text{ mV/V}} = 0,0121 \%$$

$$r = F_1 \cdot \frac{r}{100} = 100 \text{ lbf} \cdot \frac{0,0121 \text{ mV/V}}{100} = 0,0121 \text{ lbf}$$

Kuvvet ölçme cihazının alt kuvvet sınırını (LLF) hesaplayabilmek için, öncelikle alınan değerlerin standart sapma değerinin hesaplanması gereklidir.

$$s_m = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{n - m - 1}}$$

$$s_m = \sqrt{\frac{((-0,08264 - (-0,08266))^2 + (-0,08265 - (-0,08266))^2 + (-0,08268 - (-0,08266))^2)}{3 - 0 - 1}}$$

$s_m = 0,0000208$ olarak bulunur.

Alt kuvvet sınırını (LLF) ise,

$LLF = 2,4 \times (F_r / F_{ort}) \times s_m = 2,4 \times (100 \text{ lbf} / (-0,08266 \text{ mV/V})) \times 0,0000208 = 0,0604 \text{ lbf}$ ($k=2,4$ için) şekilde bulunur. Bu durumda, tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği bileşeni (u_r), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_r = \frac{LLF}{2,4} = \frac{0,0604 \text{ lbf}}{2,4}$$

$u_r = 0,025 \text{ lbf (k = 1)}$ olarak bulunur.

Çözünürlük bağılı ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{res}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$r = 0,00001 \text{ mV/V}$ olduğu verilmiştir. Bu değeri lbf biriminde ifade edebilmek için,

$$r = 100 \cdot \frac{r}{F_1} = 100 \cdot \frac{-0,00001 \text{ mV/V}}{-0,08266 \text{ mV/V}} = 0,0121 \%$$

$$r = F_1 \cdot \frac{r}{100} = 100 \text{ lbf} \cdot \frac{0,0121 \text{ mV/V}}{100} = 0,0121 \text{ lbf}$$

Çözünürlük belirsizliği bileşeni (u_{res}), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_{res} = \frac{r}{\sqrt{12}} = \frac{0,0121 \text{ lbf}}{3,464}$$

$u_{res} = 0,003 \text{ lbf (k = 1)}$ olarak bulunur.

Son olarak, birleşik ölçüm belirsizliği:

$$u_c = \sqrt{u_w^2 + u_v^2 + u_r^2 + u_{res}^2} = \sqrt{0,008^2 + 0^2 + 0,025^2 + 0,003^2}$$

$u_c = 0,025 \text{ lbf (k = 1)}$ olarak bulunur.

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş ölçüm belirsizliği ise;

$$U_c = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,025$$

$U_c = 0,051 \text{ lbf}$ olarak bulunur.

Yüzde olarak ise,

$$U_c = 100 \cdot U_c / F_1 = 100 \cdot 0,025 \text{ lbf} / 100 \text{ lbf}$$

$U_c = 0,051 \%$ olarak bulunur.

Kalibrasyon sertifikasında diğer basamaklarda benzer şekilde ölçüm belirsizlik değerleri hesaplanmalı ve en büyük değer, cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Bir sonraki sayfada hesaplanmış tablo verilmiştir.

Tablo 4.7. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri ve belirsizlik değerleri

Uygulanan	Seri 1	Seri 2	Seri 3	Ortalama	u_w	u_v	u_r	u_{res}	U	U
lbf	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	lbf (k=1)	lbf (k=1)	lbf (k=1)	$u_{res}/\sqrt{12}$ (k=1)	lbf (k=2)	% (k=2)
100	-0,08264	-0,08265	-0,08268	-0,08266	0,0008	0,000	0,025	0,003	0,051	0,051
500	-0,41328	-0,41331	-0,41333	-0,41331	0,004	0,000	0,025	0,003	0,051	0,010
1000	-0,82664	-0,82667	-0,82666	-0,82666	0,008	0,000	0,025	0,003	0,053	0,005
1500	-1,24008	-1,24007	-1,24012	-1,24009	0,012	0,000	0,025	0,003	0,056	0,004
2000	-1,65361	-1,65362	-1,65364	-1,65362	0,016	0,000	0,025	0,003	0,060	0,003
2500	-2,06722	-2,06727	-2,06729	-2,06726	0,020	0,000	0,025	0,003	0,065	0,003
3000	-2,48092	-2,48096	-2,48097	-2,48095	0,024	0,000	0,025	0,003	0,070	0,002
3500	-2,89473	-2,89467	-2,89472	-2,89471	0,028	0,000	0,025	0,003	0,076	0,002
4000	-3,30851	-3,30857	-3,30859	-3,30856	0,032	0,000	0,025	0,003	0,082	0,002
4500	-3,72245	-3,72249	-3,72250	-3,72248	0,036	0,000	0,025	0,003	0,088	0,002
5000	-4,13634	-4,13641	-4,13644	-4,13640	0,040	0,000	0,025	0,003	0,095	0,002

Kuvvet ölçme cihazının 100 lbf ile 5000 lbf ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir.

Örneğin: 100 lbf ile 5000 lbf ölçüm aralığı için $\pm$ % 0,051 kuvvet ölçme cihazının ölçüm belirsizliğidir.

4.8. DKD-R 3-3'e Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu

Genel olarak, DKD-R 3-3 kuvvet ölçüm cihazlarının statik kalibrasyonu için diğer metodlara göre daha yüksek ölçüm belirsizliği veren basitleştirilmiş bir yöntemdir. Kalibrasyon metoduna bağlı olarak, ölçüm serisi başına daha az kuvvet ölçüm noktası ve daha az ölçüm serisi içerir.

Çevre Koşulları

Önemli çevre koşulları (çevre sıcaklığı, hava basıncı, bağıl hava nemi) gözlenmeli ve kalibrasyon belgesinde belirtilmelidir. Gerektiğinde ölçme belirsizliği bütçesinde dikkate alınmalıdır. İzin verilen sıcaklık aralığı, EN ISO 376 standardına uygun olarak 18 °C ila 28 °C olarak belirlenmiştir. Almanya'daki kalibrasyon laboratuvarları için 19 °C ve 23 °C arasındaki referans sıcaklık önerilmektedir. Kalibrasyon süresince ölçüm düzeneği, termal dengede olmalıdır ve çevre sıcaklığı ise kalibrasyon cihazının bulunduğu pozisyonda 1 K'da stabil tutulmak zorundadır.

Kalibrasyon işlemi

Kalibrasyon öncesi kuvvet dönüştürücü ve kuvvet ölçme cihazı sıcaklık dengesi için açılmalı ve ortamda bekletilmelidir. Kuvvet dönüştürücü hangi yönde (çekme ve/veya basma yönü) kullanılıyorsa o yönde kalibrasyonu yapılmalıdır ve değerlendirilmelidir. Hangi yönde kalibrasyon yapılacaksa ölçüme başlamadan önce 3 kez kalibrasyon yönünde ön yükleme yapılmalıdır. Her montajda ön yüklemeler tekrarlanmalıdır. Ön yükleme en az 1 dakika olmalıdır. Sıfır okuması yük boşaltıldıktan en az 30 saniye sonra yapılmalıdır.

Kalibrasyon için kuvvet adımları mümkün olduğunca tüm kapasiteye yayılmalıdır. Her seri aynı kuvvet adımlarında gerçekleştirilmelidir. Aynı serideki farklı kuvvet adımına geçişler eşit zaman aralıklarında ve bu zaman aralığı en az 30 saniye olmalıdır. İlave olarak, her kuvvet noktasında okuma yapmadan önce en az 30 saniye beklenmeli yada kuvvet değeri stabil olduktan sonra okuma gerçekleştirilmelidir. Yük hücresinin üzerinde herhangi bir yük değeri yok iken, her bir ölçüm serisinin başlangıcında ve bitişindeki sıfır sinyalleri yazılmalıdır. Bu standartta A'dan D'ye kadar ifade edilmiş dört kalibrasyon metodu tarifedilmiştir. DKD R3-3'e göre kalibrasyon metodları aşağıdaki şekildedir. Özet tabloasında Tablo 4.8'de verilmiştir.

Metod A:

3 montaj konumu

 ≥ 5 kuvvet adımı (3 ncü derece denklem) ≥ 3 kuvvet adımı (1 nci derece denklem)**Metod B:**

1 montaj konumu

2 Artan ve azalan ölçüm serisi

 ≥ 5 kuvvet adımı (3 ncü derece denklem) ≥ 3 kuvvet adımı (1 nci derece denklem)**Metod C:**

1 montaj konumu

1 Artan ve azalan ölçüm serisi

 ≥ 3 kuvvet adımı (1 nci derece denklem)**Metod D:**

1 montaj konumu

2 Artan ölçüm serisi

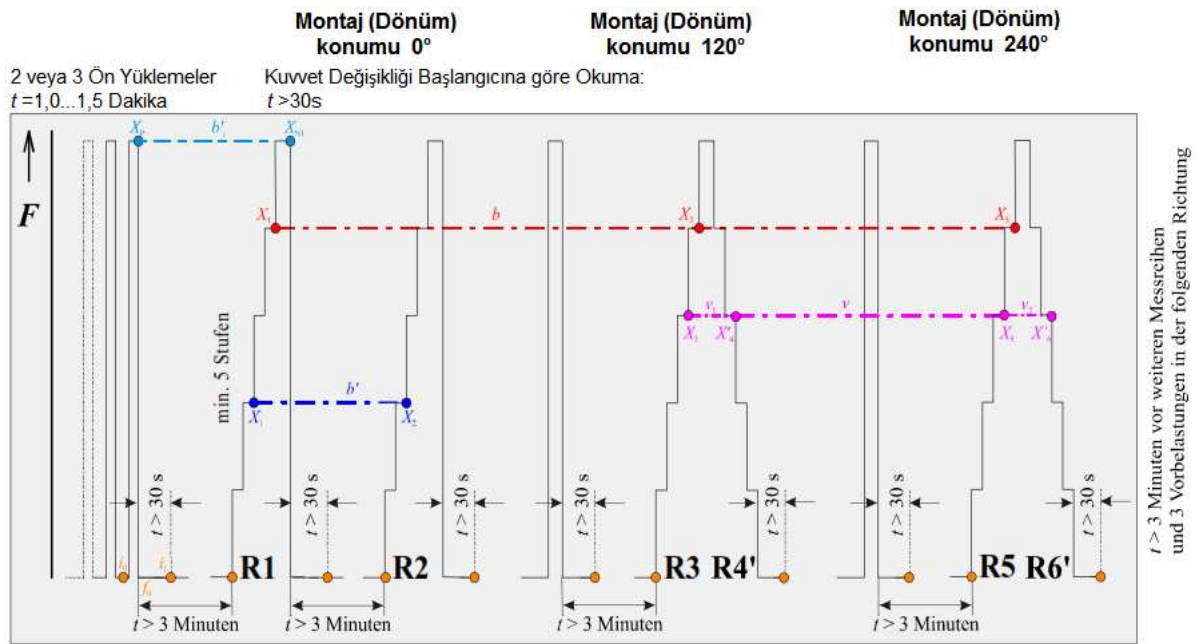
 ≥ 3 kuvvet adımı (1 nci derece denklem)

Tablo 4.8. Kalibrasyon prosedürü parametreleri

Kalibrasyon Metodu	Ön Yükleme Sayısı	Montaj (dönüm) konumları sayısı	Ölçüm Serileri sayıları		Ölçüm Noktası sayısı Sıfır hariç ve her artan ve azalan yüklemede		Kuvvet Adımları % FS
			Artan	Azalan	1. derece	3. derece	
A	3	3	4	2	≥ 3	≥ 5	20, 40, 60, 80, 100 veya 20, 60, 100
B	2...3	1	2	2	≥ 3	≥ 5	
C	2...3	1	1	1	≥ 3	-	
D	2...3	1	2	-	≥ 3	-	

Metod A:

EN ISO 376 standardında tarif edilen kalibrasyon yönteminin benzeri şekilde hazırlanan Metod A metodu olup (Şekil 4.7), sadece kuvvet nokta sayısı düşürülmüştür. Burada ölçüm değerlerinden belirlenen ve ölçüm belirsizliğinde kullanılan tüm parametrelerin (tekrar üretilebilirlik, tekrarlanabilirlik, tersinebilirlik, sıfır sapması) belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.7: Metod A; üç montaj pozisyonlu ve beş kuvvet adımlı olarak kuvvet zaman grafiği

Metod A yönteminde kalibre edilecek cihaz kalibrasyon sistemine bağlandıktan sonra 0° montaj konumunda, 3 adet ön yükleme yapılır ve ön yükleme maksimum kuvvet noktasında en az 1 dakika beklenir. Her ön yüklemeden önce sistem yüksüz iken cihaz sıfır değeri kaydedilir ve ön yükleme yapıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek tekrar sıfır değeri kaydedilir. Yük boşaltıldıktan sonra çevrime başlamadan önce sistem yüksüz halde iken en az 3 dakika beklenir. Cihaz sıfırlandıktan sonra artan yönde sıfır hariç en az 5 kuvvet adımıyla ölçümler gerçekleştirilir.

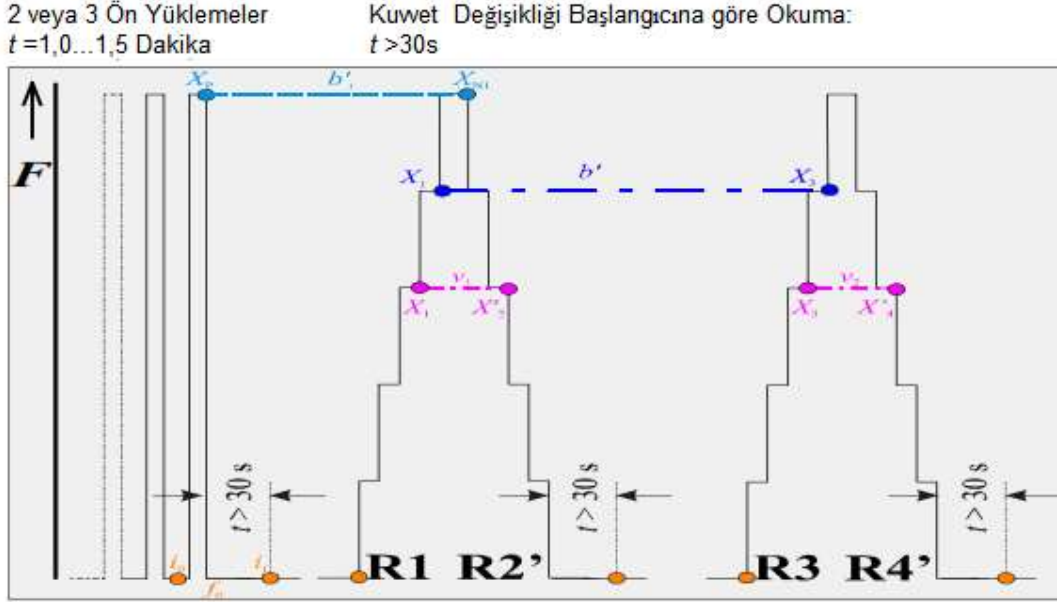
Her bir kuvvet adımımda istenilen kuvvet değerine ulaşıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek ya da ölçüm sistemi kararlı olduktan sonra gösterge değeri okunur ve maksimum kuvvet noktasındaki okuma işlemi tamamlanarak sistemdeki yük boşaltılır. En az 30 saniye beklenerek ölçüm sonu sıfır değeri kaydedilir. İkinci artan yönde seriye başlamadan önce en az 3 dakika beklenir ve ilk ölçüm serisindeki aynı işlemler gerçekleştirilir.

Üçüncü seri ölçümlere başlamadan önce kalibre edilecek cihaz 120° çevrilerek 1 kez maksimum kapasitede ön yükleme yapılır ve yük boşaltılır. En az 3 dakikalık bekleme süresinden sonra önceki serilerdeki kuvvet noktalarında artan yönlü yükleme işlemleri (3ncü seri) gerçekleştirilir. 3ncü serinin maksimum noktasında en az 30 saniye beklendikten sonra gösterge değeri kaydedilir ve aynı kuvvet noktalarında azalan yönde 4ncü serinin ölçümleri gerçekleştirilir. Çevrim sonunda yük boşaltılır ve en az 30 saniye sonra ölçüm sonu sıfır değeri kaydedilir.

5nci (artan yönde) ve 6ncı (azalan yönde) serilere başlamadan önce kalibre edilecek cihaz 240° konumuna getirilir. 1 kez ön yükleme yapıldıktan sonra en az 3 dakika beklenerek 3ncü ve 4ncü serilerdeki işlemler tekrarlanarak kalibrasyon tamamlanır.

Metod B:

Metod B'de sadece bir montaj pozisyonunda artan ve azalan serilerden oluşan iki ölçüm çevrimi şeklinde kalibrasyon yapılır (Şekil 4.8).



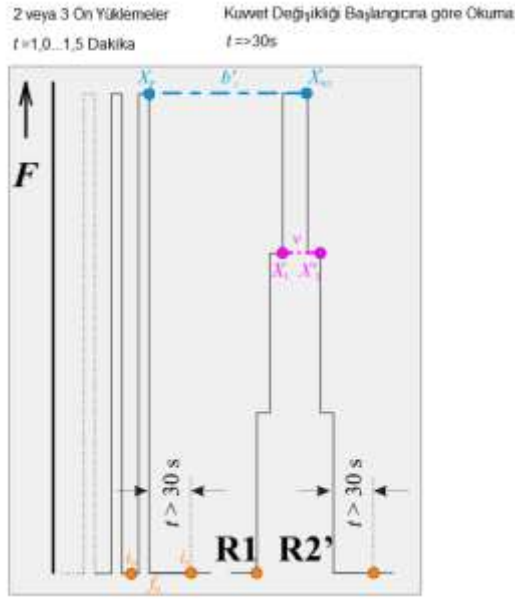
Şekil 4.8: Metod B; bir montaj pozisyonlu ve beş kuvvet adımında kuvvet zaman grafiği

Metod B yönteminde kalibre edilecek cihaz kalibrasyon sistemine bağlandıktan sonra 2 veya 3 adet ön yükleme yapılır ve ön yükleme maksimum kuvvet noktasında en az 1 dakika beklenir.

Her ön yüklemeden önce sistem yüksüz iken cihaz sıfır değeri kaydedilir ve ön yükleme yapıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek tekrar sıfır değeri kaydedilir. Yük boşaltıldıktan sonra çevrime başlamadan önce sistem yüksüz halde iken en az 3 dakika beklenir. Cihaz sıfırlandıktan sonra artan yönde sıfır hariç en az 5 kuvvet adımında ölçümler gerçekleştirilir. Her bir kuvvet adımında istenilen kuvvet değerine ulaşıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek ya da ölçüm sistemi kararlı olduktan sonra gösterge değeri okunur ve maksimum kuvvet noktasındaki okuma işlemi tamamlanarak sistemdeki yük boşaltılır. En az 30 saniye beklenerek ölçüm sonu sıfır değeri kaydedilir. İkinci artan yönde seriye başlamadan önce en az 3 dakika beklenir ve ilk ölçüm serisindeki aynı işlemler gerçekleştirilerek kalibrasyon tamamlanır.

Metod C:

Bu metotta bir montaj pozisyonunda artan ve azalan serilerden oluşan bir ölçüm gerçekleştirilerek kalibrasyon yapılır (Şekil 4.9)



Şekil 4.9: Metod C; bir montaj pozisyonlu, üç kuvvet adımlı, bir artan ve azalan yükleme serili olarak kuvvet zaman grafiği

Metod C yönteminde kalibre edilecek cihaz kalibrasyon sistemine bağlandıktan sonra 2 veya 3 adet ön yükleme yapılır ve ön yükleme maksimum kuvvet noktasında en az 1 dakika beklenir. Her ön yüklemeden önce sistem yüksüz iken cihaz sıfır değeri kaydedilir ve ön yükleme yapıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek tekrar sıfır değeri kaydedilir. Yük boşaltıldıktan sonra çevrime başlamadan önce sistem yüksüz halde iken en az 3 dakika beklenir. Cihaz sıfırlandıktan sonra artan yönde sıfır hariç en az 3 kuvvet adımı ölçümler gerçekleştirilir. Her bir kuvvet adımı istenilen kuvvet değerine ulaşıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek ya da ölçüm sistemi kararlı olduktan sonra gösterge değeri okunur ve maksimum kuvvet noktasındaki okuma işlemi tamamlandıktan sonra aynı kuvvet noktalarında azalan yönde ölçümler gerçekleştirilir.

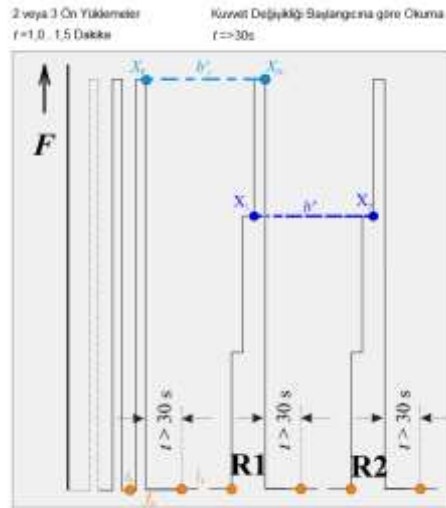
Yük boşaltıldıktan en az 30 saniye beklenerek ölçüm sonu sıfır değeri kaydedilir ve kalibrasyon tamamlanır.

Metod D:

Bu metotta bir montaj pozisyonunda sadece artan serilerden oluşan iki adet ölçüm gerçekleştirilir (Şekil 4.10).

Metod D yönteminde kalibre edilecek cihaz kalibrasyon sistemine bağlandıktan sonra, 2 veya 3 adet ön yükleme yapılır ve ön yükleme maksimum kuvvet noktasında en az 1 dakika beklenir. Her ön yüklemeden önce sistem yüksüz iken cihaz sıfır değeri kaydedilir ve ön yükleme yapıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek tekrar sıfır değeri kaydedilir. Yük boşaltıldıktan sonra çevrime başlamadan önce sistem yüksüz halde iken en az 3 dakika beklenir. Cihaz sıfırlandıktan sonra artan yönde sıfır hariç en az 3 kuvvet adımı ölçümler gerçekleştirilir.

Her bir kuvvet adımımda istenilen kuvvet değerine ulaşıldıktan sonra en az 30 saniye beklenerek ya da ölçüm sistemi kararlı olduktan sonra gösterge değeri okunur ve maksimum kuvvet noktasındaki okuma işlemi tamamlanarak sistemdeki yük boşaltılır. En az 30 saniye beklenerek ölçüm sonu sıfır değeri kaydedilir. İkinci artan yönde seriye başlamadan önce en az 3 dakika beklenir ve ilk ölçüm serisindeki aynı işlemler gerçekleştirilir ve kalibrasyon tamamlanır.



Şekil 4.10: Metod D; bir montaj pozisyonlu, üç kuvvet adımlı, iki artan yükleme serili olarak kuvvet zaman grafiği

Değerlendirme ve Sertifikalandırma

DKD R 3-3 dokümanına göre referans kuvvet değerleri, ölçülen değerler, hesaplamalar ve kalibrasyon belgelendirmesi için gerekli tüm bilgilerin ölçüm belirsizliği ile birlikte verilmesi gerektiği tanımlanmıştır. Yaygın olarak DKD R 3-3'e göre sertifikalandırma EN ISO 376 standardına benzer olarak yapılmakta, ancak en önemli farklı bir sınıflandırma değerinin verilmemesidir.

4.9. DKD-R 3-3'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Kuvvet ölçme cihazlarının DKD R 3-3 dokümanına göre kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması tanımlanmıştır. Belirsizlik model fonksiyonu ve tüm belirsizlik parametreleri tanımlanmıştır. Şekil 4.11 ve 4.12’de farklı kuvvet ölçme cihazları için belirsizlik bileşenleri gösterilmiştir. DKD R 3-3 dokümanına göre belirsizlik hesabı yukarıda verilen EN ISO 376 standardının Ek C kısmına uygun olarak yapılan belirsizlik hesabının benzeridir. Sadece kullanılan kısaltmalar ve alt indislemeler farklıdır.

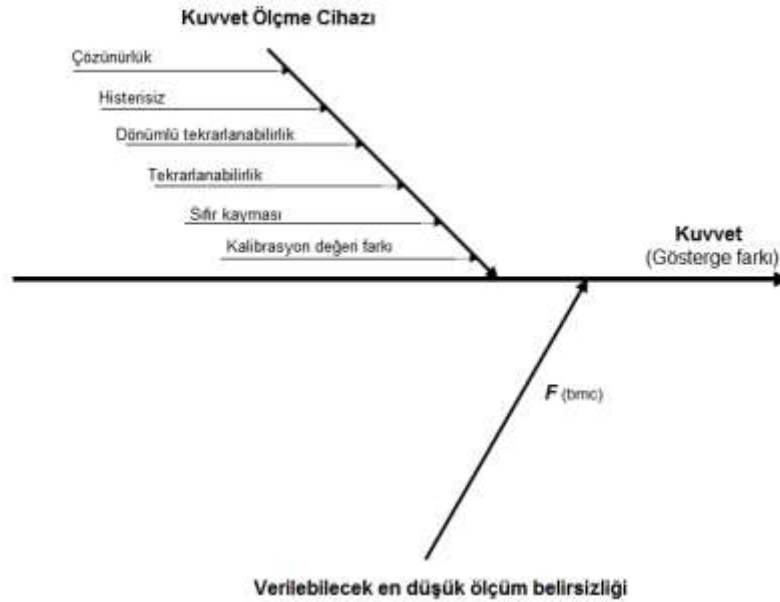
DKD R 3-3 dokümanına göre belirsizlik hesabının uygulanmasında dikkat edilmesi gereken husus tanımlanan metotlara göre ölçüm yöntemlerinin kısaltılması nedeniyle bazı hata değerlerinin

belirlenememesidir. Bu durumda DKD R 3-3 dokümanında indirgenmiş kalibrasyon yöntemlerinde ölçüm belirsizliği katsayılarının belirlenmesi üzerine Bölüm 3.9'te açıklamalar verilmiştir.

Kalibrasyon cihazının türüne bağlı olarak (bkz. Şekil 4.11 ve 4.12) kalibrasyonun farklı sonuç büyüklükleri bulunur. Bu farklı ölçüm belirsizlik katkıları ile değerlendirilen farklı modellerin kullanıldığı anlamına gelir. Aşağıda 2 farklı model için metod 1 ve metod 2 belirsizlik hesaplama yöntemleri tanımlanmıştır.

Metod 1:

Etkileyen Faktörler



Şekil 4.11. Üstünde göstergeli bir kuvvet ölçme cihazının ölçüm belirsizliği hesabındaki etken büyüklükler

Belirsizlik Analizi

Dağıtım fonksiyonları ve bağıl değişkenler, aşağıdaki Tablo 4.9'da gösterilmiştir:

Tablo 4.9: Etki büyüklüklerinin dağılım fonksiyonları ve değişkenleri

Bağıl Değişken Tanımı	Değişken	Olasılık Dağılımı	Bağıl Değişken, $u^2(x_i)$
Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	$F_{ind}; F_{ind,0}$	Dikdörtgen	$u^2(F_{ind}) = u^2(F_{ind,0}) = \frac{a_{res}^2}{3}$
Referans kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	F_{bmc}	Normal	$u^2(F_{bmc})$
Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	δF_t	Dikdörtgen	$u^2(\delta F_t) = \frac{a_t^2}{3}$
Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	δF_{zer}	Dikdörtgen	$u^2(\delta F_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$
Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	δF_{rep}	Dikdörtgen	$u^2(\delta F_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$
Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	δF_{rot}	U tipi	$u^2(\delta F_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$
Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	δF_{rev}	Dikdörtgen	$u^2(\delta F_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$

$P_i = \pm 1$ faktörlü doğrusal toplam / fark modeli nedeniyle, duyarlılık katsayıları her zaman 1'e eşittir ($c_i = \pm 1$). Sonuç değişkeninin belirsizliğine $u_i(y)$ katkıları, giriş büyüklüklerinin $u(x_i)$ karelerinin toplamalarının kareköküne eşittir. Bu durumda birleşik belirsizlik:

$$u(\Delta F) = \sqrt{u_{Sind}^2(\Delta F) + u_{Sind,0}^2(\Delta F) + u_{bmc}^2(\Delta F) + u_t^2(\Delta F) + u_{zer}^2(\Delta F) + u_{rep}^2(\Delta F) + u_{rot}^2(\Delta F) + u_{rev}^2(\Delta F)}$$

olarak bulunur. Genişletilmiş belirsizlik değeri:

$$U(\Delta F) = k \cdot u(\Delta F)$$

Metod B, C ve D kalibrasyon süreçlerinde sadece bir montaj pozisyonunda kalibrasyon yapılır. Burada karşılaştırma hassasiyeti belirlenemeyebilir ve bu durumda belirsizlik katkısı varsayılan bilgiye dayanır. 120° açıyla 3 seri beklenti değerinin belli olan ölçüm değerlerinde ideal sinüs şeklindeki girişimi, sıfıra eşit olduğu sürece metod B, C ve D süreçlerinde kaydedilmiş olan ölçüm değeri, sinüs şeklindeki girişimin genlik aralığında olup, bu, $\pm b/2$ aralığında olduğu anlamına gelir. Bu düzeltilemeyen sistematik fark, ayrıca söz konusu belirsizlik aralığındaki ölçüm belirsizliği ile birlikte dikkate alınır:

$$U'(\Delta F) = \left| \frac{b}{2} \cdot F_{bmc} \right| + k \cdot u(\Delta F)$$

Metod 2:**Etkileyen Faktörler**

Şekil 4.12. Aynı gösterge elemanına sahip bir kuvvet ölçme cihazının ölçüm belirsizliği hesabındaki etken büyüklükler

Belirsizlik Analizi

Dağıtım fonksiyonları ve bağıl değişkenler, aşağıdaki Tablo 4.10'da gösterilmiştir:

Tablo 4.10: Etki büyüklüklerinin dağılım fonksiyonları ve değişkenleri

Bağıl Değişken Tanımı	Değişken	Olasılık Dağılımı	Bağıl Değişken, $w^2(x_i)$
Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	$S_{ind}, S_{ind,0}$	Normal	$w^2(S) = w_{MG}^2$ burada ekrandaki dalgalanma dikkate alınmaz
Referans kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	F_{bmc}	Normal	$w^2(F_{bmc})$
Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	K_t	Dikdörtgen	$w^2(K_T) = \frac{a_t^2}{3}$
Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	K_{zer}	Dikdörtgen	$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$
Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	K_{rep}	Dikdörtgen	$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$
Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	K_{rot}	U tipi	$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$
Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	K_{rev}	Dikdörtgen	$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$

Hassasiyet katsayıları, bağıl ölçüm belirsizliklerinin kullanımı ve seçilen doğrusal ürün modeli nedeniyle her zaman aynı ve değeri 1 olur ($c_i = \pm 1$).

Böylece sonuç büyüklüğün belirsizliğine yönelik katkıları $w_i(y)$, giriş büyüklüklerinin $w(x_i)$ karelerinin toplamalarının kareköküne eşittir. Bu durumda birleşik belirsizlik:

$$w(E) = \sqrt{w_{\text{Sind}}^2(E) + w_{\text{Sind},0}^2(E) + w_{\text{bmc}}^2(E) + w_t^2(E) + w_{\text{zer}}^2(E) + w_{\text{rep}}^2(E) + w_{\text{rot}}^2(E) + w_{\text{rev}}^2(E)}$$

olarak bulunur. Genişletilmiş belirsizlik değeri:

$$W(E) = k \cdot w(E)$$

Metod B, C ve D kalibrasyon süreçlerinde sadece bir montaj pozisyonunda kalibrasyon yapılır. Burada karşılaştırma hassasiyeti belirlenemeyebilir ve bu durumda belirsizlik katkısı varsayılan bilgiye dayanır. 120° açıyla 3 seri beklenti değerinin belli olan ölçüm değerlerinde ideal sinüs şeklindeki girişimi, sıfıra eşit olduğu sürece metod B, C ve D süreçlerinde kaydedilmiş olan ölçüm değeri, sinüs şeklindeki girişimin genlik aralığında olup, bu, $\pm b/2$ aralığında olduğu anlamına gelir. Bu düzeltilemeyen sistematik fark, ayrıca söz konusu belirsizlik aralığındaki ölçüm belirsizliği ile birlikte dikkate alınır:

$$w'(E) = \frac{b}{2} + k \cdot w(E)$$

4.10. İndirgenmiş Kalibrasyon Süreçlerinde Ölçüm Belirsizliği Katkıları

Tam kalibrasyon süreci olan Metod A' da tüm ilgili ölçüm belirsizlik katkıları DKD R 3-3 uygun şekilde hesaplanabilir. Ancak indirgenmiş süreçler olan B, C ve D kalibrasyon metodları için söz konusu bilgiler başka bir şekilde temin edilmelidir. Bu amaç için, aşağıdaki kaynaklara başvurmak mümkündür:

- Tip testi bilgileri
- Daha önce yapılmış olan tam kalibrasyon sertifikası
- Cihaz bilgi formu verileri

Bu şekilde belirlenen ölçüm belirsizliği katkılarının değerleri, kullanımdan önce bir faktörle çarpılmalıdır. Bu çarpım faktörün büyüklüğü, bilgilerin kökenine veya güvenilirliğine bağlı olabilir. Aşağıdaki tabloda çarpım faktörleri tanımlanmıştır. Faktör hesapları ile ilgili detaylı bilgi DKD R 3-3 dokümanında tanımlanmıştır. Daha fazla bilgi için dokümanı inceleyebilirsiniz.

Tablo 4.11: Farklı kaynaklardan alınan ölçüm belirsizlik katkıları ile ilgili faktör değerleri

I.	Aynı türdeki kuvvet ölçüm cihazlarının kendi K-BNME {Referans kalibrasyon cihazları donanımı} içinde uygulanan kalibrasyonu (tip testi)	t-faktör * 2....4,3
II.	EN ISO 376 veya metod A uyarınca aynı cihazın önceki kalibrasyonu	Faktör 2
III.	VDI / VDE / DKD 2638 tanımına göre ölçüm değeri ile ilgili bilgi formu bilgileri olarak (üst limit olarak) desteklenecek değerler	Faktör 2
IV.	Diğer ölçüm değeri ile ilgili bilgi formu bilgileri (üst sınırlar olarak)	Faktör 3
V.	Diğer ölçüm değeri ile ilgili bilgi formu bilgileri (genel bilgiler olarak)	Faktör 5

* Araştırılan örneklerin sayısına bağlı faktörler; student dağılım faktörü kullanılmıştır. Bu durumda faktör, > 50 örnek değeri için 2 ve 3 örnek değeri için 4,3 arasındadır. (% 95 güvenirlik düzeyi için)

4.11. DKD R 3-3'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

El tipi kuvvet ölçme cihazının (Şekil 4.13), DKD R 3-3 dokümanına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Örnek el tipi kuvvet ölçer fotoğrafı

Tablo 4.12. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Ölçüm Adımları	0° Konum		120° Konum		240° Konum	
Referans	1. Seri	2. Seri	3. Seri	4. Seri	5. Seri	6. Seri
F	R1	R2	R3	R4'	R5	R6'
N	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
0	0	0	0	0,002	0	0,002
40	0,204	0,204	0,204	0,204	0,204	0,204
80	0,405	0,406	0,404	0,405	0,406	0,405
120	0,607	0,607	0,608	0,607	0,607	0,608
160	0,809	0,809	0,807	0,808	0,808	0,809
200	1,011	1,011	1,012	-	1,012	-
0	0,003	0,003	-	-	-	-

Şekil 4.13'te verilen cihaz kendi üzerinde kuvvet göstergesi olması nedeniyle yukarıda tarif edilmiş olan Metod 1 yöntemine göre belirsizlik değeri hesaplanacaktır.

Tablo 4.12.'de yer alan 80 N kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{Find}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a_{80} = 100 \cdot \frac{r}{X_{r80}} = 100 \cdot \frac{0,001 \text{ mV/V}}{0,405 \text{ mV/V}}$$

$a_{80} = \% 0,25$ olarak bulunur.

$$u_{Find}^2 = \frac{a_{80}^2}{3} = \frac{0,25^2}{3}$$

$u_{Find}^2 = \% 0,0203$ olarak bulunur.

El tipi kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, referans kuvveti uygulayan sistemin bağıl belirsizlik değeri u_{Fbmc}^2 , o cihazın sertifikasından alınır. Bu örnek için, TÜBİTAK UME Ölü Ağırlıklı Kuvvet Kalibrasyon Makinasının bağıl ölçüm belirsizliği $\% 0,08$ ($k=2$ için) olarak alınmıştır. Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{Fbmc}^2), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_{Fbmc}^2 = \left(\frac{\% 0,08}{2} \right)^2$$

$u_{Fbmc}^2 = \% 0,0016$ olarak bulunur.

Enterpolasyon hatası belirsizlik bileşeninin hesaplanması için, öncelikle 80 N kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_r), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$X_r = \frac{R_1 + R_3 + R_5}{3} = \frac{0,405 + 0,404 + 0,406}{3} = 0,405 \text{ mV/V}$$

Bu örnek için gösterge değerlerinin ortalama değerlerinden (X_r) 1. dereceden denklem çıkarımı yapılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$X_a \text{ (mV/V)} = 0,0051 \cdot F \text{ (N)}$$

Bu denklem kullanılarak 80 N kuvvet basamağı için X_a değeri

$$X_a = 0,0051 \cdot 80 \text{ N} = 0,408 \text{ mV/V}$$

Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{Ft}^2) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a_t = 100 \cdot \frac{x_r - x_a}{x_a} = 100 \cdot \frac{0,405 - 0,408}{0,408}$$

$$a_t = \% -0,74 \text{ olarak bulunur.}$$

$$u_{Ft}^2 = \frac{a_t^2}{3} = \frac{-0,74^2}{3}$$

$$u_{Ft}^2 = \% \mathbf{0,1802} \text{ olarak bulunur.}$$

Sıfır değeri bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{Fzer}^2) hesabı için, sıfır değeri kayma hatasının maksimum ve minimumu hesaplanmalıdır. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler yapılır;

$$a_{zer \max} = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100 = \frac{0,003 - 0}{1,011} \cdot 100 = 0,30 \%$$

$$u_{Fzer}^2 = \frac{a_{zer}^2}{3} = \frac{0,30^2}{3}$$

$$u_{Fzer}^2 = \% \mathbf{0,0293} \text{ olarak bulunur.}$$

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{Frep}^2) hesabı için, öncelikle 80 N kuvvet basamağı için dönümsüz gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_{wr}), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$x_{wr} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{0,405 + 0,406}{2} = 0,406$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası değeri (a_{rep}) şöyle hesaplanmalıdır.

$$a_{rep} = \frac{x_2 - x_1}{x_{wr}} \cdot 100 = \frac{0,406 - 0,405}{0,406} \cdot 100 = 0,25 \%$$

Böylece, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{Frep}^2) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_{Frep}^2 = \frac{a_{rep}^2}{3} = \frac{0,25^2}{3}$$

$u_{Frep}^2 = \% 0,0203$ olarak bulunur.

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{Frot}^2) hesabı için, öncelikle 80 N kuvvet basamağı için yukarıda hesaplanan dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_r) kullanılarak tekrar üretilebilirlik hatası değeri aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$a_{rot} = \frac{R_{\max 1,3,5} - R_{\min 1,3,5}}{x_r} \cdot 100 = \frac{0,406 - 0,404}{0,405} \cdot 100 = 0,49 \%$$

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{Frot}^2) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_{Frot}^2 = \frac{a_{rot}^2}{2} = \frac{0,49^2}{2}$$

$u_{Frot}^2 = \% 0,1219$ olarak bulunur.

Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{Frev}^2) hesabı için, öncelikle 80 N kuvvet basamağı için bağıl tersinebilirlik hatası (v_1, v_2, a_{rev}) ifadelerinin, aşağıdaki gibi hesaplanması gerekmektedir.

$$v_1 = \left| \frac{R_4' - R_3}{R_3} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,405 - 0,404}{0,404} \right| \cdot 100 = 0,25 \%$$

$$v_2 = \left| \frac{R_6' - R_5}{R_5} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,405 - 0,406}{0,406} \right| \cdot 100 = 0,25 \%$$

$$a_{rev} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{0,25 + 0,25}{2} = 0,25 \%$$

Bu kapsamda tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{Frev}^2) hesabı için aşağıdaki işlemler yapılır;

$$u_{Frev}^2 = \frac{a_{rev}^2}{3} = \frac{0,25^2}{3}$$

$u_{Frev}^2 = \% 0,0203$ olarak bulunur.

Son olarak birleşik belirsizlik:

$$\begin{aligned}
 u(\Delta F) &= \sqrt{u_{Sind}^2(\Delta F) + u_{Sind,0}^2(\Delta F) + u_{bmc}^2(\Delta F) + u_t^2(\Delta F) + u_{zer}^2(\Delta F) + u_{rep}^2(\Delta F) + u_{rot}^2(\Delta F) + u_{rev}^2(\Delta F)} \\
 &= \sqrt{0,0203^2 + 0,0203^2 + 0,0016^2 + 0,1802^2 + 0,0293^2 + 0,0203^2 + 0,1219^2 + 0,0203^2} \\
 u(\Delta F) &= \% \mathbf{0,6437} \text{ olarak bulunur.}
 \end{aligned}$$

% 95 güvenirlilik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda el tipi kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$U(\Delta F) = k \cdot u(\Delta F) = 2 \cdot 0,6437$$

$$U(\Delta F) = \% \mathbf{1,287} \text{ olarak bulunur}$$

Kalibrasyon sertifikasında diğer basamaklarda benzer şekilde ölçüm belirsizlik değerleri hesaplanmalı ve en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20'si ile % 100'ü arasında belirlenirse bu cihaz için 40 N ile 200 N ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir.

Örneğin: 40 N - 200 N ölçüm aralığı için $\pm \% 1,287$ el tipi kuvvet ölçme cihazının ölçüm belirsizliğidir.

4.12. BS 8422 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu

BS 8422 standardı kuvvet ölçüm cihazlarının statik kalibrasyonu için EN ISO 376 standardına benzer bir yöntemdir. Ancak farklılıkları ve uygulanması gereken işlemler ve hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

BS 8422 standardına göre kalibrasyon işlemi aşağıda tarif edildiği şekilde 3 seri ölçüm içerir. Eğer müşteri talep ederse yine aşağıda verilmiş olan ek kalibrasyon işlemleri de uygulanabilir.

Kuvvet ölçme cihazlarının tüm elektriksel bağlantı detaylarının sertifikada verilmesi gerektiğini standart tanımlamaktadır.

Çevre Koşulları

Önemli çevre koşulları (çevre sıcaklığı, hava basıncı, bağıl hava nemi) gözlenmeli ve kalibrasyon belgesinde belirtilmelidir. Gerektiğinde ölçme belirsizliği bütçesinde dikkate alınmalıdır. İzin verilen sıcaklık aralığı 18 °C ila 28 °C olarak belirlenmiştir. Kalibrasyon süresince ölçüm düzeneği, termal dengede olmalıdır ve çevre sıcaklığı ise kalibrasyon cihazının bulunduğu pozisyonda $\pm 2^{\circ}\text{C}$ stabil tutulmak zorundadır.

Kalibrasyon işlemi

Kalibrasyon öncesi kuvvet dönüştürücü ve kuvvet ölçme cihazı sıcaklık dengesi için açılmalı ve ortamda bekletilmelidir. Kuvvet dönüştürücü hangi yönde (çekme ve/veya basma yönü) kullanılıyorsa o yönde kalibrasyonu yapılmalıdır ve değerlendirilmelidir. Hangi yönde kalibrasyon yapılacaksa ölçüme başlamadan önce 3 kez kalibrasyon yönünde ön yükleme yapılmalıdır. Her montajda ön yüklemeler tekrarlanmalıdır. Ön yükleme zamanı 60 s ila 90 s arasında olmalıdır. Sıfır okuması yük boşaltıldıktan en az 30 saniye sonra yapılmalıdır.

Kalibrasyon için kuvvet adımları mümkün olduğunca tüm kapasiteye yayılmalıdır. En az 5 eşit kuvvet basamağı uygulanması tanımlanmıştır. Her seri aynı kuvvet adımlarında gerçekleştirilmelidir. Aynı serideki farklı kuvvet adımına geçişler eşit zaman aralıklarında ve bu zaman aralığı en az 30 saniye olmalıdır. İlave olarak, her kuvvet noktasında okuma yapmadan önce en az 30 saniye beklenmeli ya da kuvvet değeri stabil olduktan sonra okuma gerçekleştirilmelidir. Kuvvet ölçme cihazı üzerinde herhangi bir yük değeri yok iken, her bir ölçüm serisinin başlangıcında ve bitişindeki sıfır sinyalleri yazılmalıdır. Artan ve azalan değerlerde kalibrasyon kuvvetinin aşamalı olarak kuvvet ölçme cihazına 3 defa (3 seri) uygulanmalıdır. Her bir kuvvet serisi arasında, ölçme cihazı kendi eksenini etrafında simetrik olarak, 360° 'ye eşit olarak dağıtılmış konumlara (örneğin, 0° , 120° , 240°) döndürülür. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, (0° , 180° , 360°) gibi üç konumun uygulanması kabul edilebilir. Serilerdeki kuvvet basamakları yaygın olarak kuvvet ölçme cihazının en büyük kapasitesinin 5 kuvvet adımına bölünmesiyle elde edilecek kuvvetler şeklinde belirlenir.

Kuvvet Ölçme Cihazı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

BS 8422 standardına göre alınan veriler aşağıdaki hata değerleri hesaplanarak değerlendirilir.

Bağıl Doğrusallık Hatası

Bu hata, referans kuvvet değerine karşılık alınan gösterge değerleri kullanılarak en küçük karalar metodu kullanılarak elde edilen polinom denklemi ile ölçülen değerler arasındaki farktan belirlenir. Her bir kuvvet basamağı için artan yönde ölçülen değer ile hesaplanan değerler arasındaki farktan yüzde olarak hesaplanır. Hesaplanan maksimum fark değeri kalibrasyon sertifikasında kullanılan denklem katsayıları ile birlikte verilmelidir. Standartta tavsiye olarak ikinci derece denklem kullanılması önerilmektedir. Ancak müşteri isterse birinci derece denklem de kullanılabilir. Sertifikada denklem iki şekilde (sıfırdan geçecek ve geçmeyecek) verilmelidir.

Bağıl Tekrar Üretilirlik Hatası

Artan yönde uygulanan kuvvet değerlerine karşılık alınan üç seri ölçümler arasındaki maksimum farktan hesaplanır. Hesaplanan maksimum fark değeri yüzde oranı olarak kalibrasyon sertifikasında verilmelidir. Eğer kuvvet ölçme cihazı daha önceden bu standarda uygun olarak kalibre edilmişse, standard kuvvet serilerinin aynı konumda yapılmasına müsaade eder. Bu durumda tekrarlanabilirlik hatası tekrar üretilebilirlik hatası ile aynı olacaktır. Bu durumun sertifikada belirtilmesi gerektiği standartta ifade edilmiştir.

Kalibrasyon Sertifikası

Kalibrasyon sertifikası BS 8422 standardına göre en az aşağıdaki bilgileri içermelidir:

- Kuvvet ölçme cihazının ve tüm elemanlarının tanıtılması,
- Müşterinin adı ve adresi,
- Laboratuvarın adı,
- İzlenebilirlik ve standartların belirsizlikleri,
- Kalibrasyon metodunun detayları,
- Kalibrasyon öncesi yapılan herhangi bir ayarlama detayları,
- Tüm kalibrasyon sonuçları, belirsizlik değeri de dahil olarak verilmelidir.

Standartın Ek A kısmında örnek kalibrasyon sertifikası verilmiştir.

Ek kalibrasyon işlemleri

Ek kalibrasyon işlemleri ve ölçüm sonucunda hesaplanması gereken değerler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

1) Bağıl Tekrarlanabilirlik Hatası

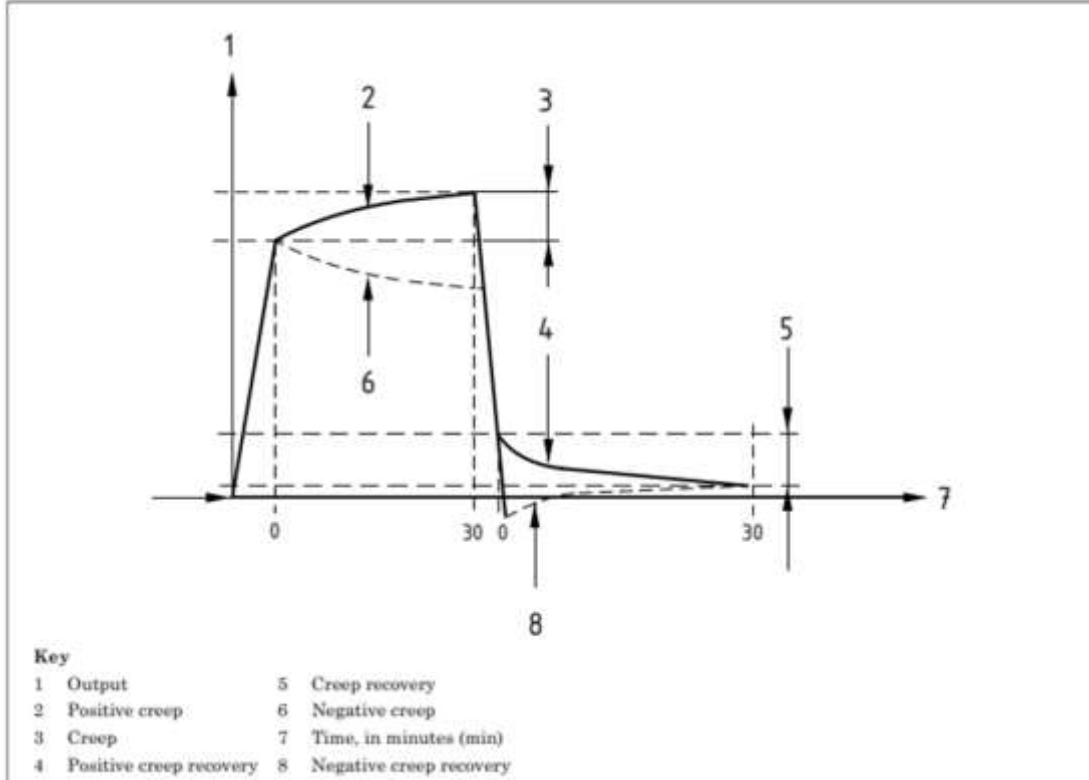
Artan yönde uygulanan kuvvet değerlerine karşılık alınan üç seri ölçümler arasındaki maksimum farktan hesaplanır. Hesaplanan maksimum fark değeri yüzde oranı olarak kalibrasyon sertifikasında verilmelidir.

2) Bağıl Tersinebilirlik Hatası

Bağıl tersinebilirlik hatası, artan ve azalan gösterge değerlerinin ortalaması alındıktan sonra, artan yöndeki gösterge değerinden azalan yöndeki kuvvet değeri çıkartılarak hesaplanır. Hesaplanan maksimum fark değeri yüzde oranı olarak kalibrasyon sertifikasında verilmelidir.

3) Bağıl Sürünme Hatası,

4) Sürünme Toparlanma Hatası



Şekil 4.14. Sürünme ve sürünme toparlanma hatası şematik grafiği

Bağıl sürünme hatası, aşağıdaki şekilde verilen grafikteki gibi yükleme sonrası hesaplanır. Öncelikle kuvvet ölçme cihazı uygun şekilde konumlandırıldıktan sonra maksimum kuvvet uygulanır ve 30 ila 60 dakika arasında bir periyotta datalar toplanır. Maksimum kuvvet uygulandıktan hemen sonra ilk değer kaydedilir. Daha sonra 5 dakikayı geçmeyen aralıklarla 30 dakika datalar kaydedilir. Başlangıç değeri ile son değer arasındaki fark hesaplanır. Hesaplanan maksimum fark değeri yüzde oranı olarak 30 dakikada sürünme hatası değeri olarak kalibrasyon sertifikasında verilmelidir.

Maksimum kuvvet kaldırıldıktan hemen sonra ilk değer kaydedilir. Daha sonra 5 dakikayı geçmeyen aralıklarla 30 dakika datalar kaydedilir. Başlangıç değeri ile son değer arasındaki fark hesaplanır. Hesaplanan maksimum fark değeri yüzde oranı olarak 30 dakikada sürünme toparlanma hatası değeri olarak kalibrasyon sertifikasında verilmelidir.

5) Bağlı Sıfır Hatası

Üç kez maksimum kuvvet değeri uygulanır ve ortalama sıfır değerleri ile ortalama maksimum gösterge değerleri kullanılarak bağlı sıfır hatası hesaplanır.

6) Sıfır Kuvvette Sıcaklık Etkisi Hatası

Laboratuvar şartları 20°C ayarlanır ve kuvvet dönüştürücü sıfır değeri okunur. Laboratuvar şartlarının minimum sıcaklık değeri ayarlanır ve yine kuvvet dönüştürücünün sıfır değeri okunur. Sonra laboratuvar şartlarının maksimum sıcaklık değeri ayarlanır ve yine kuvvet dönüştürücünün sıfır değeri okunur. Sonra laboratuvar şartları tekrar 20°C ayarlanır ve yine kuvvet dönüştürücünün sıfır değeri okunur. Üç sıcaklık değişimi için kuvvet dönüştürücü gösterge değerleri arasındaki fark sıcaklık değişimine bölünerek yüzde olarak hesaplanır.

7) Maksimum Kuvvette Sıcaklık Etkisi Hatası

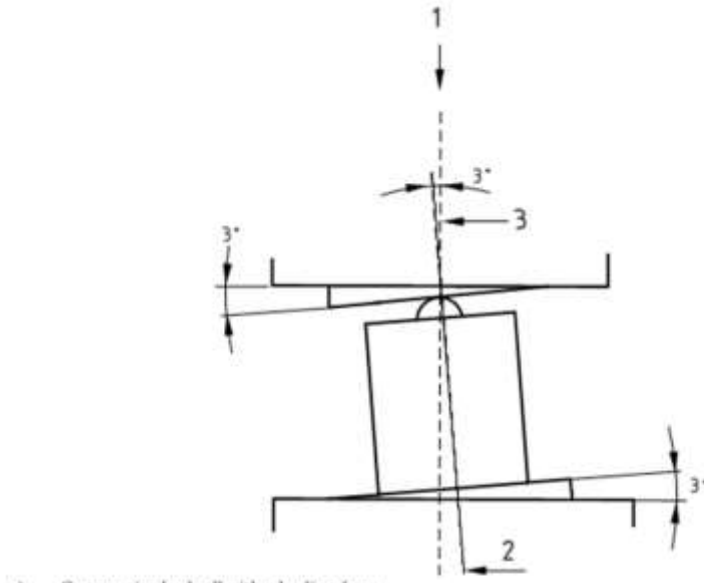
Laboratuvar şartları 20°C ayarlanır ve kuvvet dönüştürücü sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri uygulanıp 60 s sonra gösterge değeri kayıt edilir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri 60 s sonra kayıt edilir. Aynı işlem 2 defa daha uygulanıp 3 maksimum kuvvet değeri elde edilir. Sonra laboratuvar şartlarının minimum sıcaklık değeri ayarlanır ve aynı 3 yükleme uygulanır değerler alınır. Daha sonra laboratuvar şartlarının maksimum sıcaklık değeri ayarlanır ve yine aynı işlem uygulanır. Sonra laboratuvar şartları tekrar 20°C ayarlanır ve yine aynı işlem uygulanır. Üç sıcaklık değişimi için kuvvet dönüştürücü ortalama gösterge değerleri arasındaki fark sıcaklık değişimine bölünerek yüzde olarak hesaplanır.

8) Uygulanan Kuvvetin Konsantrik (eş merkez) Uygulanmaması Hatası (Bu test sadece basma tip dönüştürücüler içindir)

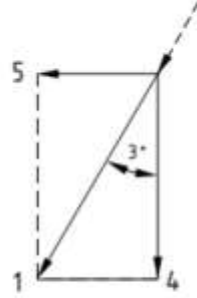
Kuvvet ölçme cihazı kalibrasyon makinası üzerine aşağıdaki şekilde verildiği biçimde 3° açı ile konumlandırılır ve kuvvet dönüştürücü sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri uygulanıp 60 s sonra gösterge değeri kayıt edilir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri de 60 s sonra kayıt edilir. Aynı işlem 2 defa daha uygulanıp 3 maksimum gösterge değerinden ortalama değeri (d_1) hesaplanır. Uygulanan kuvvetin konsantrik uygulanmaması hatası (e_1), maksimum sapma değerinin yüzdesi (d_{max}) yardımıyla aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$e_1 = \frac{(d_1 / \cos 3^\circ) + d_{max}}{d_{max}} \cdot 100 \quad (1)$$

Bu işlem kuvvet ölçme cihazı kendi eksenini etrafında 45°'lik açılar ile döndürülmesi ile 7 kez tekrarlanır. Toplam 8 adet (e_1) değeri hesaplanır. En büyük kayıt edilen (e_1) değeri sertifikada verilmelidir.



a) Compression load cell with a loading dome

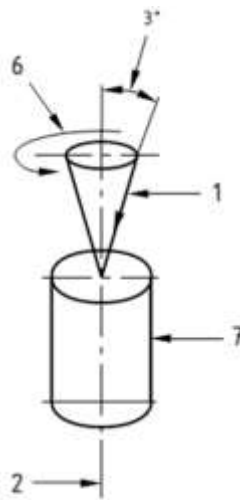


b) Force diagram

Key

- 1 Applied force
- 2 Principal axis
- 3 Loading axis
- 4 Force along principal axis

- 5 Side force
- 6 Rotational angle
- 7 Load cell



c) Representation of concentric angular loading

Key

- 1 Applied force
- 2 Principal axis
- 3 Loading axis
- 4 Force along principal axis

- 5 Side force
- 6 Rotational angle
- 7 Load cell

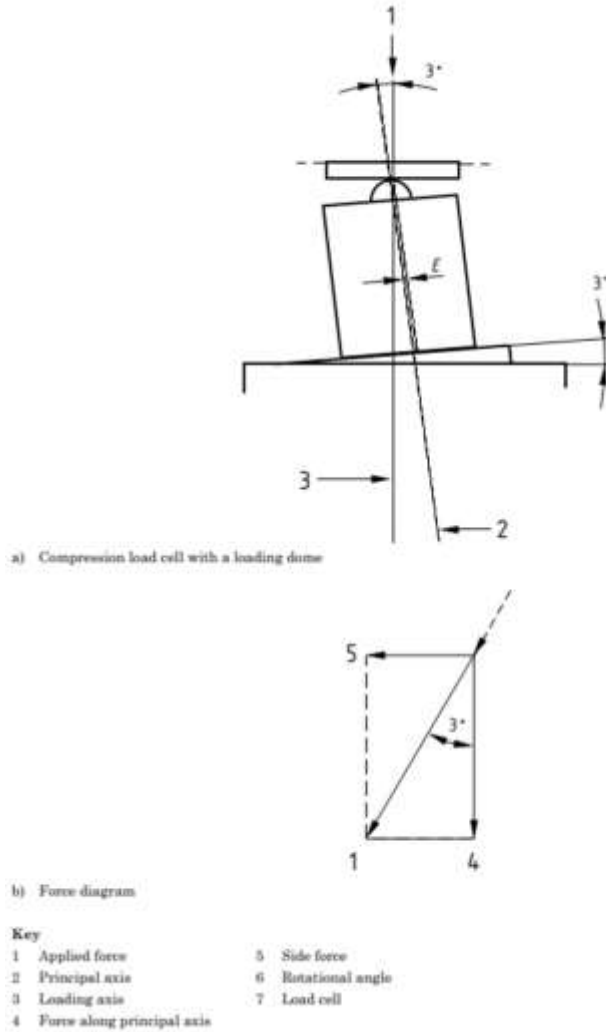
Şekil 4.15. Kuvvetin konsantrik uygulanması prensip şekli

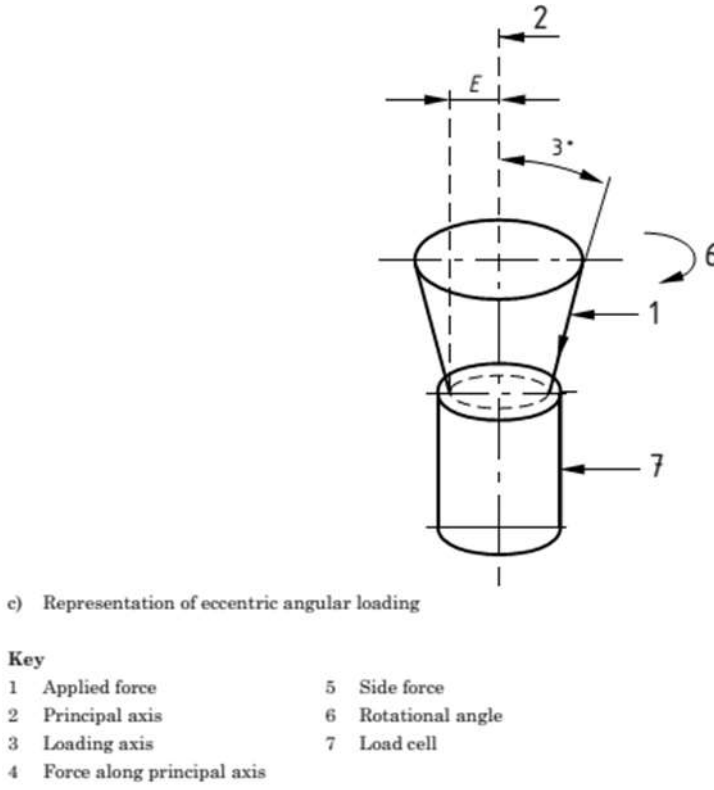
9) Uygulanan Kuvvetin Eksantrik (ekseni merkezden geçmeyen) Uygulanması Hatası (Bu test sadece basma tip dönüştürücüler içindir)

Kuvvet ölçme cihazı kalibrasyon makinası üzerine aşağıdaki şekilde verildiği biçimde 3° açı ile konumlandırılır ve kuvvet dönüştürücü sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri uygulanıp 60 s sonra gösterge değeri kayıt edilir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri de 60 s sonra kayıt edilir. Aynı işlem 2 defa daha uygulanıp 3 maksimum gösterge değerinden ortalama değeri (d_2) hesaplanır. Uygulanan kuvvetin konsantrik uygulanmaması hatası (e_2), maksimum sapma değerinin yüzdesi (d_{max}) yardımıyla aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$e_2 = \frac{(d_2 / \cos 3^\circ) + d_{max}}{d_{max}} \cdot 100 \quad (2)$$

Bu işlem kuvvet ölçme cihazı kendi eksenini etrafında 45°'lik açılar ile döndürülmesi ile 7 kez tekrarlanır. Toplam 8 adet (e_2) değeri hesaplanır. En büyük kayıt edilen (e_2) değeri sertifikada verilmelidir.





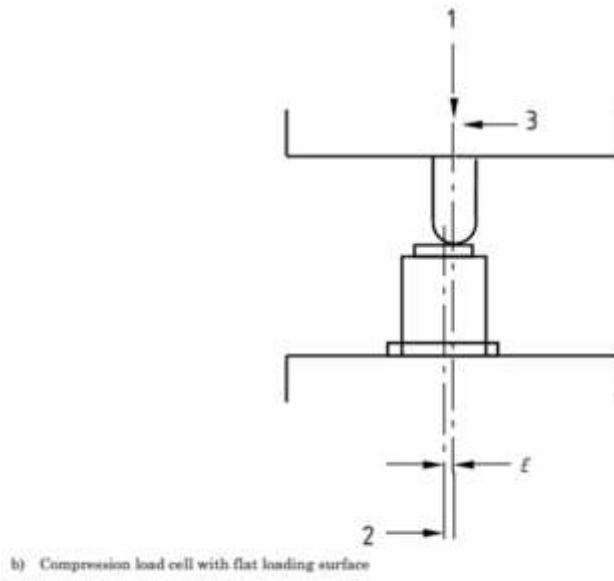
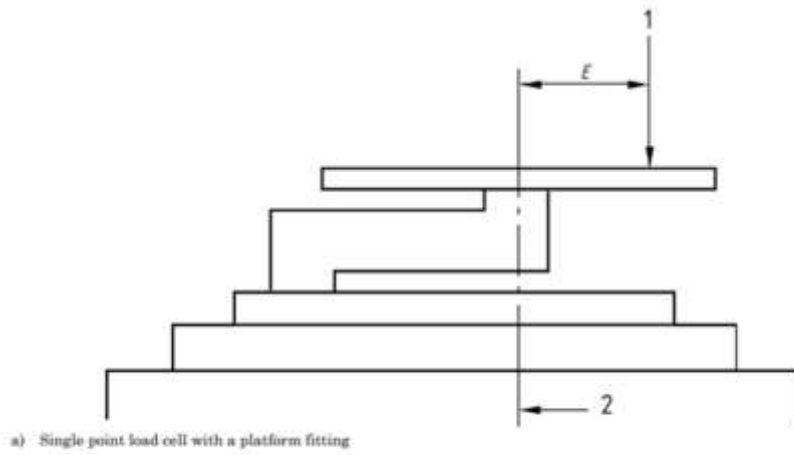
Şekil 4.16. Kuvvetin eksantrik uygulanması prensip şekli

10) Eksantrik (ekseni merkezden geçmeyen) Kuvvet Etkileri Hatası (Bu test sadece basma tip dönüştürücüler içindir)

Kuvvet ölçme cihazı kalibrasyon makinası üzerine aşağıdaki şekilde verildiği biçimde eksen den geçmeyen kuvvet olarak konumlandırılır ve kuvvet dönüştürücü sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri uygulanıp 60 s sonra gösterge değeri kayıt edilir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri de 60 s sonra kayıt edilir. Aynı işlem 2 defa daha uygulanıp 3 maksimum gösterge değerinden ortalama değeri (d_3) hesaplanır. Uygulanan kuvvetin konsantrik uygulanmaması hatası (e_3), maksimum sapma değerinin yüzdesi (d_{max}) yardımıyla aşağıdaki formül ile hesaplanır.

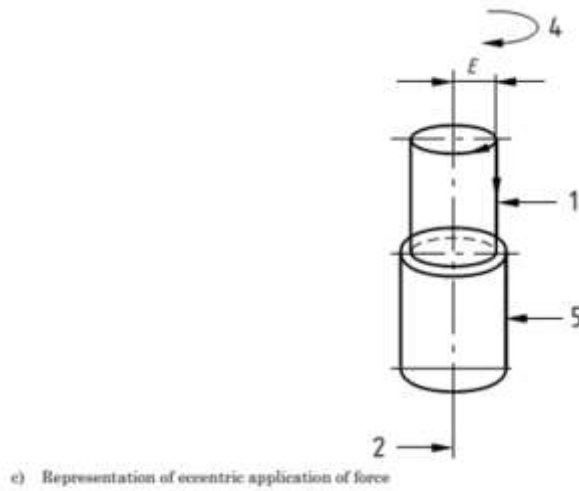
$$e_3 = \frac{d_3 - d_{max}}{d_{max}} \cdot 100 \quad (3)$$

Bu işlem kuvvet ölçme cihazı kendi eksen i etrafında 45°'lik açılar ile döndürülmesi ile 7 kez tekrarlanır. Toplam 8 adet (e_3) değeri hesaplanır. En büyük kayıt edilen (e_3) değeri sertifikada verilmelidir.



Key

- | | |
|------------------|--------------------|
| 1 Applied force | 4 Rotational angle |
| 2 Principal axis | 5 Load cell |
| 3 Loading axis | |



Key

- | | |
|------------------|--------------------|
| 1 Applied force | 4 Rotational angle |
| 2 Principal axis | 5 Load cell |
| 3 Loading axis | |

Şekil 4.17. Kuvvetin eksantrik uygulanması prensip şekli

11) Temel Yükleme Etkileri Hatası (Bu test sadece basma tip dönüştürücüler içindir)

Bu ölçümün yapılabilmesi için 4 adet yükleme başlığına ihtiyaç vardır. Bunlar; düz, kama şekilli, iç bükey ve dış bükey başlıklardır.

Düz yükleme başlığı, yüzeylerinin paralellığı 1/10000 değerini aşmamalıdır. Başlığın temas eden yüzeyinin sertliği 400 HV 30'dan az olmamalı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü merkez çizgisi 32 µm aşmamalıdır.

Kama şekilli yükleme başlığı, yüzeylerinin açısı $3,00^\circ \pm 0,05^\circ$ olmalı, temas eden yüzeyinin sertliği 400 HV 30'dan az olmamalı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü merkez çizgisi 32 µm aşmamalıdır.

Dış bükey yükleme başlığı, dış bükeyliği $(1,0 \pm 0,1)$ in / 1000 in olmalı, temas eden yüzeyinin sertliği 400 HV 30'dan az olmamalıdır.

İç bükey yükleme başlığı, iç bükeyliği $(1,0 \pm 0,1)$ in / 1000 in olmalı, temas eden yüzeyinin sertliği 400 HV 30'dan az olmamalıdır.

Temel yükleme etkilerini belirlemek için öncelikle düz yükleme başlığı kuvvet ölçme cihazının üzerine yerleştirilir. Kuvvet dönüştürücüye 3 kez ön yükleme uygulanır. Sonra sıfır değeri ve minimum kuvvet değeri uygulanıp 30 s sonra gösterge değeri kayıt edilir. Maksimum kuvvet değeri uygulanıp 30 s sonra gösterge değeri kayıt edilir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri de 30 s sonra kayıt edilir. Minimum ve maksimum kuvvetler için sapma değerleri hesaplanır. Aynı işlem 2 kez daha tekrarlanarak elde edilen 3 değerden her bir kuvvet için ortalama sapma belirlenir.

Düz yükleme başlığı yerine dış bükey yükleme başlığı yerleştirilerek yukarıda tarif edilen aynı yüklemeler uygulanır ve ortalama sapma değerleri belirlenir.

Aynı işlemler bir de iç bükey yükleme başlığı yerleştirilerek yukarıda tarif edilen aynı yüklemeler uygulanır ve ortalama sapma değerleri belirlenir.

3 adet minimum kuvvetteki sapma değerlerinin saçılmasından ve 3 adet maksimum kuvvet değerlerinin saçılmasında yüzde olarak maksimum değer belirlenir.

12) Sıfır kuvvette çıkış kararlılığı

Eğer bir sonraki maddede verilen maksimum kuvvette çıkış kararlılığı belirlenebiliyorsa sıfır kuvvette çıkış kararlılığı olarak kullanılabilir.

Kuvvet ölçme cihazı üzerine ön yükleme işlemi uygulanır. Kuvvet ölçme cihazı ortam sıcaklık değişimi minimum olabilecek bir ortama yerleştirilir ve besleme voltajı uygulanır. Kuvvet ölçme cihazının 3 haftadan az olmayan bir periyot içerisinde 3 gün aralığını aşmayacak şekilde minimum 15 sıcaklık ve sıfır değeri kaydedilir. Sıfır değerlerindeki saçılma değerlerinden yüzde olarak maksimum sapma değeri hesaplanır. Kalibrasyon sertifikasında sıcaklık değerleri ile birlikte sapma değeri verilir.

13) Maksimum kalibrasyon kuvvetinde çıkış kararlılığı

Kuvvet ölçme cihazı üzerine ön yükleme işlemi uygulanır. Kuvvet ölçme cihazının sıfır değeri alındıktan sonra maksimum kuvvet uygulanıp 30 s sonra gösterge değeri ve ortam sıcaklığı değeri alınır ve kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri alınır. Bu işlem 2 kez daha tekrarlanır. Kuvvet ölçme cihazına aynı pozisyonda 3 haftadan az olmayan bir periyot içerisinde 3 gün aralığını aşmayacak şekilde aynı işlemler uygulanır ve değerler kaydedilir. Maksimum kuvvet değerlerindeki saçılma değerlerinden yüzde olarak maksimum sapma değeri hesaplanır. Kalibrasyon sertifikasında sıcaklık değerleri ile birlikte sapma değeri verilir.

14) Nemli ısı etkisi

Kuvvet ölçme cihazının neme duyarlılığının ölçümü sıfır kuvvetteki kayma değeri ile belirlenir.

Kuvvet ölçme cihazı ve kablosuna BS EN 60068-2-30 ve BS EN 60068-3-4'te verildiği şekilde nemli ısı testi uygulanır. Testin üst sıcaklığı 55 °C'dir. Sıcaklık BS EN 60068-2-30'da verildiği şekilde 2 değişken uygun şekilde düşürülür. Kuvvet ölçme cihazı enerjili konumda test edilir. Müşterinin özel bir isteği yok ise 10 tekrar olarak bu işlem uygulanır. Test başlamadan önce alınan sıfır değerleri ile test sonrası alınan sıfır değerlerini kullanarak yüzde olarak maksimum sapma değeri hesaplanır. Kalibrasyon sertifikasında test tekrar sayısı ile birlikte sapma değeri verilir.

Eğer mümkünse, benzer sıcaklıklarda sıfır kuvvetteki gösterge değerleri alınır ve yukarıda açıklanan sıfır kuvvette sıcaklık kararlılığı hatası belirlenebilir.

15) Yalıtım etkisi

Kuvvet ölçme cihazı ve kablosuna BS EN 60529 standardında verildiği şekilde müşterinin istediği IP değerlendirmesi testi uygulanır. Kuvvet ölçme cihazı enerjili konumda test edilir.

Test başlamadan önce alınan sıfır değerleri ile test sonrası alınan sıfır değerlerini kullanarak yüzde olarak maksimum sapma değeri hesaplanır. Kalibrasyon sertifikasında belirtilir.

Eğer mümkünse, benzer sıcaklıklarda sıfır kuvvetteki gösterge değerleri alınır ve yukarıda açıklanan sıfır kuvvette sıcaklık kararlılığı hatası belirlenebilir.

16) Besleme voltajı etkileri

Kuvvet ölçme cihazı tavsiye edilen besleme voltajı ile beslenir.

Kuvvet ölçme cihazı üzerine ön yükleme işlemi uygulanır. Kuvvet ölçme cihazının sıfır değeri alındıktan sonra maksimum kuvvet uygulanıp 30 s sonra gösterge değeri alınır ve kuvvet kaldırıldıktan sonra sıfır değeri tekrar alınır. Bu işlem 2 kez daha tekrarlanır.

Kuvvet ölçme cihazına maksimum besleme voltajı uygulanır ve voltaj değişiminden sonra sıcaklığın kararlılığı için müsaade edilen zaman beklenir. Yukarıdaki aynı işlemler uygulanır. Bu iki besleme durumu arasında hesaplanan sapma değerleri arasındaki fark yüzde olarak hesaplanır.

4.13. BS 8422'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kapsamındaki ölçüm belirsizliği hesaplaması, BS 8422 standardının Ek B kısmında detaylı olarak açıklanmıştır.

Kuvvet ölçme cihazının kuvvet standardı makinasında kalibrasyonu BS 8422 standardına göre gerçekleştirilir. Daha sonra elde edilen veriler kullanılarak, ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (uygulanan kuvvet, tekrar üretilebilirlik, çözünürlük ve sıcaklık) bileşenler hesaplanır. Kalibrasyon verileri elde edildikten sonra her bir kuvvet değeri için etki büyüklüklerinin bağlı değerleri hesaplanır. Bileşik belirsizlik aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{u_F^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \quad (12)$$

Genişletilmiş bağlı belirsizlik ise;

$$U = k \times u_c \quad (13)$$

Eşitliklerdeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

u_c : cihazın toplam bağlı ölçüm belirsizliği,

u_F : Uygulanan kuvvetin bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni,

u_{rep} : Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirlik bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni,

u_{4es} : Gösterge çözünürlüğünün bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni,

k : kapsam faktörü

U : toplam genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliğini ifade eder.

Bu parametrelerin hesabına aşağıda detaylı olarak yer verilmiştir.

Kalibrasyon kuvvetinin bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_F :

Kalibrasyon kuvveti, kuvvet ölçme cihazına kuvvetini uygulayan sistemin sertifikasından bağlı belirsizlik değeri (U_{ref}) olarak alınır.

$$u_F = \frac{U_{ref}}{2} \quad (k = 1) \quad (15)$$

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{rep} :

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$u_{rep} = 100 \cdot \frac{\sigma}{d \cdot \sqrt{n}} \quad (16)$$

d: Kuvvet ölçme cihazının ortalama gösterge değeri,

n: Kalibrasyonda uygulanan seri sayısı,

σ : Gösterge değerinin standart sapmasını ifade eder.

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{res} :

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$u_{res} = 100 \cdot \frac{r}{2d \cdot \sqrt{3}} \quad (17)$$

d: Kuvvet ölçme cihazının ortalama gösterge değeri

r: Gösterge cihazının ilgili birimde çözünürlük değerini ifade eder.

Birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesabı, u_c :

Bağıl değerler kullanılarak birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliği yukarıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{u_F^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \quad (12)$$

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü ($k=2,0$) alınır, bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$U = k \times u_c \quad (13)$$

4.14. BS 8422'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

Kuvvet ölçme cihazının, BS 8422 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.13. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Referans	0° konumu	120° konumu	240° konumu	Saçılma	Ortalama	Tersinebilirlik
	1. Seri	2. Seri	3. Seri	-	-	-
F	R1	R2	R3	-	R ort , d	-
kN	Units	Units	Units	Units	Units	Units
100	709	711	709	2	710	-
200	1421	1424	1422	3	1422	-
300	2133	2137	2135	4	2135	-
600	4268	4272	4269	4	4270	-
1200	8526	8532	8529	6	8529	-
1800	12774	12780	12777	6	12777	-
2400	17015	17021	17017	6	17018	-
3000	21247	21253	21249	6	21250	-
2400	17019	17023	17019	4	17020	3
1800	12781	12785	12781	4	12782	5
1200	8535	8539	8535	4	8536	7
600	4278	4282	4278	4	4279	10
300	2141	2145	2141	4	2142	7
200	1427	1431	1427	4	1428	6
100	713	716	712	4	714	4

Tabloda yer alan 300 kN kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, referans kuvveti uygulayan sistemin bağıl belirsizlik değeri (u_F), o cihazın sertifikasından alınır. Bu örnek için, TÜBİTAK UME Ölü Ağırlıklı Kuvvet Kalibrasyon Makinasının bağıl ölçüm belirsizliği % 0,002 ($k=2$ için) olarak alınmıştır. Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_F), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$u_F = \% 0,002 / 2 = \% 0,0010$ olarak bulunur.

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{rep}) hesabı için, öncelikle 300 kN kuvvet basamağı için gösterge değerlerinin standart sapma değeri (σ), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{R=1,2,3} (X_R - \bar{X}_r)^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3-1} \cdot ((2133 - 2135)^2 + (2137 - 2135)^2 + (2135 - 2135)^2)}$$

$\sigma = 2$ unit olarak bulunur.

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{rep}) ise,

$$u_{rep} = 100 \cdot \frac{\sigma}{d \cdot \sqrt{n}} = 100 \cdot \frac{2 \text{ unit}}{2135 \text{ unit} \cdot \sqrt{3}}$$

$u_{rep} = \% 0,0540$ olarak bulunur.

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{res}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_{res} = 100 \cdot \frac{r}{2d \cdot \sqrt{3}} = 100 \cdot \frac{1 \text{ unit}}{2 \cdot 2135 \text{ unit} \cdot \sqrt{3}}$$

$u_{res} = \% 0,0000$ olarak bulunur.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak birleştirilmiş belirsizlik aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{u_F^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} = \sqrt{0,0010^2 + 0,0540^2 + 0^2}$$

$u_c = \% 0,054$ olarak bulunur.

$\% 95$ güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$U = k \times u_c = 2 \cdot 0,054$$

$U = \% 0,108$ olarak alınır.

Kalibrasyon sertifikasında diğer basamaklarda benzer şekilde hesaplanmalı ve en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Aşağıda hesaplanmış tablo verilmiştir.

Tablo 4.14. Örnek kalibrasyon verileri için hesaplanan ölçüm belirsizlik değeri

Referans	Belirsizlik				
F	U _{ref}	U _{res}	U _{rep}	u _c	U
kN	%	%	%	%	%
100	0,0010	0,0407	0,0939	0,102	0,205
200		0,0000	0,0620	0,062	0,124
300		0,0000	0,0541	0,054	0,108
600		0,0000	0,0281	0,028	0,056
1200		0,0000	0,0203	0,020	0,041
1800		0,0000	0,0136	0,014	0,027
2400		0,0000	0,0104	0,010	0,021
3000		0,0000	0,0083	0,008	0,017

Kuvvet ölçme cihazının 100 kN ile 3000 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir.

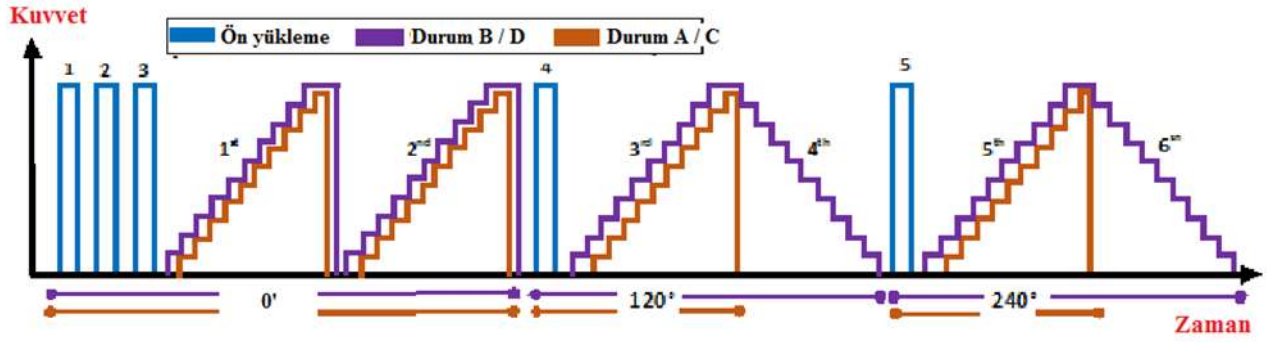
Örneğin: 100 kN ile 3000 kN ölçüm aralığı için $\pm$ % 0,205 kuvvet ölçme cihazının ölçüm belirsizliğidir.

4.15. GOST R 55223'e Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu

Kuvvet ölçme cihazlarının en yüksek doğrulukla kullanılacakları alanlar istisnai durumlar dışında “Tek Eksenli Malzeme Test Makinaları”nın kuvvet kalibrasyonu sırasında karşımıza çıkmaktadır. Bir diğer yaygın kullanım alanı ise sertlik ölçme makinalarının 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 karşılaştırılabilirliği koşulunu sağlamak amacıyla “EN (EuroNorms)” olarak ifade edilen Avrupa Standartları geliştirilmiştir. Bu kapsamda tek eksenli malzeme test makinalarının statik olarak doğruluklarının kontrolü için kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunu düzenleyen EN 10002-3 numaralı standart Mayıs 1994’de yürürlüğe girmiştir [3]. Türkiye Cumhuriyeti’nin Gümrük Birliği içinde yer alması ile ülke sınırları içinde bu standartların uygulanması koşulu oluşmuştur. 2004 yılında EN 10002-3 standardının yerine EN ISO 376 standardı yayınlanmıştır. Günümüzde yaygın olarak EN ISO 376 standardının 2011 sürümü kullanılmaktadır. GOST R 55223 standardı ise 2012 yılında ISO 376:2011 standardı referans alınarak düzenlenmiştir.

Bu standartta kuvvet kalibrasyonunun tarifi, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin kuvvet ölçme cihazına uygulanması ve kuvvet ölçme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen ölçme sisteminden (gösterge cihazından) verilerin kaydedilmesi şeklinde açıklanmaktadır.

Kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 376 standardına göre kalibrasyonu kısaca aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir. Öncelikle kuvvet ölçme cihazı, uygulanacak en büyük kuvvet kapasitesine kadar ön yük ile üç defa yüklenir. Ardından kuvvet ölçme cihazına artan değerlerde iki seri kalibrasyon kuvveti basamaklı olarak uygulanır. Bu esnada kuvvet ölçme cihazının pozisyonu değiştirilmez. Daha sonra, en az iki ilave seri artan ve azalan değerlerde belirlenmiş olan kalibrasyon kuvveti basamaklı olarak kuvvet ölçme cihazına uygulanır. Artan ve azalan değerlerde kalibrasyon kuvvetinin aşamalı olarak kuvvet ölçme cihazına uygulanması öncesinde en büyük kuvvet kapasitesine kadar bir defa ön yükleme işlemi gerçekleştirilmelidir. Her bir ilave kuvvet serisi arasında, ölçme cihazı kendi eksenini etrafında simetrik olarak, 360°’ye eşit olarak dağıtılmış konumlara (örneğin, 0°, 120°, 240°) döndürülür. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, (0°, 180°, 360°) gibi üç konumun uygulanması kabul edilebilir. Serilerdeki kuvvet basamakları yaygın olarak kuvvet ölçme cihazının en büyük kapasitesinin on kuvvet adımına bölünmesiyle elde edilecek kuvvetler şeklinde belirlenir. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda enterpolasyon eğrisinin belirlenebilmesi için, uygulanacak kuvvet basamak sayısı sekizden az olmamalıdır. Ayrıca; bu kuvvetler, kalibrasyon bölgesi üzerinde mümkün olduğunca düzgün bir şekilde dağılmış olmalıdır. Aşağıda şekilde, EN ISO 376 standardına göre çizilen kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda uygulanan kuvvet ile zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.18. EN ISO 376 standardına uygun kuvvet-zaman grafiği

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, EN ISO 376 standardının Ek C kısmında ve EURAMET CG-04 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır.

4.16. GOST R 55223'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kapsamındaki ölçüm belirsizliği hesaplaması, EN ISO 376 ve GOST R 55223 standardının Ek C kısmında ve EURAMET CG-04 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölüm, ilgili dokümanlar referans alınarak oluşturulmuştur.

Kuvvet ölçme cihazının kuvvet standardı makinasında kalibrasyonu EN ISO 376 ve GOST R 55223 standartlarına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, sürünme, sıfır, tersinebilirlik, çözünürlük, enterpolasyon, sıcaklık, kayma) bileşenler hesaplanır.

Kalibrasyon verileri elde edildikten sonra her bir kuvvet değeri için etki büyüklüklerinin bağlı değerleri hesaplanır. Aşağıda bu büyüklükler ve bunlara ait tahmini istatistiksel dağılım fonksiyonları verilmiştir. Bu dağılım fonksiyonlarının seçimi deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Bileşik belirsizlik aşağıdaki (12) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (12)$$

Genişletilmiş bağlı belirsizlik ise;

$$W = k \times w_c \quad (13)$$

Kuvvet biriminde belirsizlik ise aşağıdaki (14) numaralı eşitlik ile hesaplanır;

$$U = W \times F \quad (14)$$

Eşitliklerdeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

w_i : bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_c : cihazın toplam bağıl ölçüm belirsizliği

w_1 : Uygulanan kuvvetin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_2 : Kalibrasyon sonuçlarının yeniden üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_3 : Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_4 : Gösterge çözünürlüğünün bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_5 : Kuvvet ölçme cihazının sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_6 : Kuvvet ölçme cihazının sıfır değerindeki kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_7 : Kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

w_8 : Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

k : kapsam faktörü,

W : toplam genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği,

F : Kuvvet değeri,

U : Kuvvet birimde toplam genişletilmiş ölçüm belirsizlik değerini ifade eder.

Bu parametrelerin hesabı aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_1 :

Kalibrasyon kuvveti, kuvvet ölçme cihazına çekme ya da basma kuvvetini uygulayan sistemin sertifikasından bağıl belirsizlik değeri (U_{ref}) olarak alınır.

$$w_1 = \frac{U_{ref}}{2} \quad (k = 1) \quad (15)$$

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_2 :

Tekrar üretilebilirlik (dönümlü tekrarlanabilirlik) bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_2 = 100 \cdot \frac{1}{|\bar{X}_r|} \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2} \quad (15)$$

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_3 :

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$w_3 = \frac{b'}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_4 :

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_4 = 100 \cdot \frac{r}{\sqrt{6} \cdot X_r} \quad (17)$$

Sürünme ve tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_5 :

Eğer cihazın sınıflandırmasında sürünme hatası dikkate alınıyorsa, yani Durum A ve C için sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_5 = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

Eğer cihazın sürünme testi yapılmamış ise sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni tersinebilirlik hatasının 1/3'e dikkörtgen dağılım uygulanması ile hesaplanır. Bu durumda formül aşağıdaki (19) numaralı eşitlik şeklinde yazılır:

$$w_5 = \frac{v}{3\sqrt{3}} \quad (19)$$

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_6 :

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (20) numaralı eşitlik ile hesaplanır:

$$w_6 = f_{0 \max} \quad (20)$$

Sıcaklık bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_7 :

Sıcaklık bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_7 = 100 \cdot \frac{K \cdot \Delta T}{2\sqrt{3}} \quad (21)$$

K: Kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişim faktörü (üretici tarafından verilir),

ΔT : Kalibrasyondaki sıcaklık değişimi

K katsayısı, kuvvet ölçme cihazı üretici firmaları tarafından beyan edilen bir değer olup EN ISO 376 standardında bu katsayı $0,00027 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ alınmıştır.

Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_8 :

Bu bileşen sapma metodu ile belirlenir, enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (22) numaralı eşitlik ile hesaplanır:

$$w_8 = 100 \cdot \left| \frac{\bar{x}_r - x_a}{x_a} \right| = f_c \quad (22)$$

Birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesabı, w_c :

Bağıl değerler kullanılarak birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliği yukarıdaki bölümde verilen (12) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (12)$$

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü ($k=2,0$) alınır, bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (13) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$W = k \times w_c \quad (13)$$

Kuvvet biriminde belirsizlik ise aşağıdaki (14) numaralı eşitlik ile hesaplanır;

$$U = W \times F \quad (14)$$

4.17. GOST R 55223'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

Kuvvet ölçme cihazının, EN ISO 376 ve GOST R 55223 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen veriler GOST R 55223 standardının Ek D kısmında verilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 4.15'de verilmiştir.

Tablo 4.15. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Referans kuvvet	0° konumu		120° konumu	240° konumu
	1. Seri	2. Seri	3. Seri	-
F	X1	X2	X3	X4
kN	Unit	Unit	Unit	Unit
0	0,00135	0,00135	0,00135	0,00135
10	0,19744	0,19747	0,19774	0,19755
20	0,39355	0,39358	0,39384	0,39365
40	0,78586	0,78589	0,78617	0,78598
50	0,98203	0,98204	0,98215	0,98206
60	1,17818	1,17819	1,17828	1,17824
70	1,37439	1,37440	1,37444	1,37444
80	1,57062	1,57064	1,57065	1,57067
90	1,76689	1,76690	1,76691	1,76690
100	1,96317	1,96318	1,96318	1,96318
0	0,00136	0,00135	0,00136	0,00135

Tablo 4.15'de yer alan 20 kN kuvvet basamağı için hata ve bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır.

Hata hesaplamaları

Tekrar üretilebilirlik hatası hesabı için, öncelikle 20 kN kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri ($\bar{X}_r$), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} = \frac{0,39355 + 0,39384 + 0,39365}{3} = 0,39368$$

Daha sonra, tekrar üretilebilirlik hatası (b) hesabı aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}_r} \right| \times 100 = \left| \frac{0,39384 - 0,39355}{0,39368} \right| \times 100$$

$$b = \% 0,074$$

Tekrarlanabilirlik hatası hesabı için, öncelikle 20 kN kuvvet basamağı için dönümsüz gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_{wr}), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$X_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{0,39355 + 0,39358}{2} = 0,39357$$

Ardından, 20 kN kuvvet basamağı için dönümsüz tekrarlanabilirlik hatası değeri (b') aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{X_{wr}} \right| \times 100 = \left| \frac{0,39358 - 0,39355}{0,39357} \right| \times 100$$

$$b' = \% 0,008$$

Tersinebilirlik hatası (v) hesabı tersinebilirlik ölçümü yapılmaması sebebiyle hesaplanmamıştır.

Sürünme hatası (c) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \times 100 = \left| \frac{1,96510 - 1,96371}{1,96318} \right| \times 100$$

$$c = \% 0,0708$$

Sıfır değeri hatası (f_0) hesabı için, sıfır değeri kayma hatasının maksimum hesaplanmalıdır. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler yapılır.

$$\text{maksimum}(f_0) = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 = \frac{0,00136 - 0,00135}{1,95317} \times 100$$

$$f_0 = \% 0,0005$$

GOST R 55223 Ek D kısmında enterpolasyon denklemi aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$X_a = 97,2 \cdot 10^{-9} F^2 + 19,60826 \cdot 10^{-3} F + 1,3606 \cdot 10^{-3} \quad (F=kN)$$

Bu örnekte 20 kN kuvvet değeri için (X_a) değeri 0,39356 Unit bulunmuştur. Enterpolasyon hatası değeri (f_c) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$f_c = 100 \times \left| \frac{X_r - X_a}{X_r} \right| = 100 \times \left| \frac{0,39368 - 0,39356}{0,39368} \right|$$

$$f_c = \% 0,0293$$

Enterpolasyon hatası değeri standartta verilen değer ile uyumlu değildir. Standartta bu hata değeri $f_c = \% 0,0001$ olarak bulunmuştur. Yukarıda kullanılan formül doğru olması sebebiyle muhtemelen GOST R 55223 standardının f_c hesabında bir yanlışlık tespit edilmiştir.

Diğer kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır. Yukarıdaki formüllere göre hesaplanmış hata değerleri aşağıdadır.

Tablo 4.16. Tüm kuvvet basamakları için hesaplanmış hata değerleri

Referans kuvvet	X_r	X_{wr}	X_a	b'	b	f_c
kN	Unit	Unit	Unit	%	%	%
0	0,00135	0,00135	-	-	-	-
10	0,19758	0,19746	0,19745	0,015	0,152	0,0627
20	0,39368	0,39357	0,39356	0,008	0,074	0,0293
40	0,78600	0,78588	0,78585	0,004	0,039	0,0200
50	0,98208	0,98204	0,98202	0,001	0,012	0,0065
60	1,17823	1,17819	1,17821	0,001	0,008	0,0023
70	1,37442	1,37440	1,37442	0,001	0,004	0,0006
80	1,57065	1,57063	1,57064	0,001	0,003	0,0002
90	1,76690	1,76690	1,76689	0,001	0,001	0,0005
100	1,96318	1,96318	1,96316	0,001	0,001	0,0009
0	-	-	-	-	-	-

Cihazın Sınıflandırılması

EN ISO 376 standardında verilen sınıflandırma tablosu göre (Tablo 4.17) yukarıda 20 kN kuvvet basamağı için hesaplanan hata değerleri için Durum A, Durum B, Durum C ve Durum D'e göre sınıflandırılması Tablo 4.18'te verilmiştir

Tablo 4.17. Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırılma Kriterleri

Sınıf	Kuvvet ölçme cihazının bağıl hataları, %						Kalibrasyon Kuvveti belirsizliği(k=2)
	Tekrarlanabilirlik		Enterpolasyon	Sıfır	Tersinebilirlik	Sürünme	
	b	b'	f_c	f_0	v	c	
00	0.05	0.025	± 0.025	± 0.012	0.07	0.025	± 0.01
0.5	0.10	0.05	± 0.05	± 0.025	0.15	0.05	± 0.02
1	0.20	0.10	± 0.10	± 0.050	0.30	0.10	± 0.05
2	0.40	0.20	± 0.20	± 0.10	0.50	0.20	± 0.10

Tablo 4.18. Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırma Kriterleri

Hata parametresi	Hatanın sınıfı	Durum A b', b, f_0, c	Durum B b', b, f_0, v	Durum C b', b, f_0, f_c, c	Durum D b', b, f_0, f_c, v
$b = \% 0,074$	0.5	0.5		0.5	
$b' = \% 0,008$	00	00		00	
$v = -$			v olmadığı için değerlendirilmez		v olmadığı için değerlendirilmez
$c = \% 0,0708$	1	1		1	
$f_0 = \% 0,0005$	00	00		00	
$f_c = \% 0,0293$	0.5			0.5	
Cihazın sınıfı		1		1	

Belirsizlik hesaplaması

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, referans kuvveti uygulayan sistemin bağıl belirsizlik değeri (w_1), o cihazın sertifikasından alınır. Bu örnek için, Kuvvet Kalibrasyon Makinasının bağıl ölçüm belirsizliği $\% 0,002$ ($k=2$ için) olarak verilmiştir. Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_1), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_1 = \% 0,002 / 2 = \% 0,001$$

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_2) hesabı için, öncelikle 20 kN kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_r) 0,39368 Unit olarak yukarıda hesaplanmıştır. Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_2) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_2 = 100 \times \frac{1}{\overline{X_r}} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \overline{X_r})^2}$$

$$w_2 = 100 \times \frac{1}{0,39368} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times [(0,39355 - 0,39368)^2 + (0,39384 - 0,39368)^2 + (0,39365 - 0,39368)^2]}$$

$$w_2 = \% 0,0216$$

w_2 değeri standartta verilen değer ile uyumlu değildir. Standartta bu değer $w_2 = \% 0,0374$ olarak bulunmuştur. Yukarıda kullanılan formül doğru olması sebebiyle muhtemelen GOST R 55223 standardının w_2 değeri hesabında bir yanlışlık tespit edilmiştir.

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_3) hesabı için, 20 kN kuvvet basamağı için dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası değeri (b'), $\% 0,008$ olarak yukarıda hesaplanmıştır. Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_3) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_3 = \frac{b'}{\sqrt{3}} = \frac{0,008}{\sqrt{3}}$$

$$w_3 = \% 0,0044$$

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_4) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_4 = 100 \times \frac{r}{\sqrt{6} \times X_r} = 100 \times \frac{0,00001 \text{ unit}}{\sqrt{6} \times 0,39368 \text{ unit}}$$

$$w_4 = \% 0,0010$$

Sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_5) hesabı için, 20 kN kuvvet basamağı için bağıl sürünme hatası değeri (c), $\% 0,0708$ olarak alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_5 = \frac{c}{\sqrt{3}} = \frac{0,0708}{\sqrt{3}}$$

$$w_5 = \% 0,0409$$

w_5 değeri standartta verilen değer ile uyumlu değildir. Standartta bu değer $w_5 = \% 0,0568$ olarak bulunmuştur. Yukarıda kullanılan formül doğru olması sebebiyle muhtemelen GOST R 55223 standardının w_5 değeri hesabında bir yanlışlık tespit edilmiştir.

Tersinebilirlik ölçümü yapılmadığı için tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliğine bağlı (w_5) hesabı da yapılamaz.

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_6) hesabı için aşağıdaki işlemler yapılır.

$$w_6 = f_0 = \% 0,0005$$

$$w_6 = \% 0,0005$$

Sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_7) için, GOST R 55223 standardında her hangi bir değer belirtilmemiştir. Toplam belirsizlik hesabında da bu parametre dikkate alınmamıştır.

w_7 için bir hesap örneği olması açısından değerler tanımlanmıştır. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonundaki sıcaklık değişimi $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşmadığı ve K katsayısı da $0,00005\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ alındığında aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

$$w_7 = 100 \times \frac{K \times \Delta T}{2\sqrt{3}} = 100 \times \frac{0,00005 \times 2}{2\sqrt{3}} = \% 0,0029$$

$$w_7 = \% 0,0029$$

Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_8) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$w_8 = f_c = \% 0,0293$$

$$w_8 = \% 0,0293$$

Hata hesapları kısmında enterpolasyon hatası değerlerinin standartta verilen değer ile uyumlu olmadığı ifade edilmiştir. Ancak belirsizlik tablosunda verilen w_8 değerleri tarafımızca hesaplanan tablo 3 verilen f_c değerleri ile aynıdır. $w_8 = f_c$ olduğu için muhtemelen GOST R 55223 standardının f_c hesabında bir yanlışlık olduğu düşünülmektedir.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak birleştirilmiş belirsizlik aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^9 w_i^2} = \sqrt{0,0010^2 + 0,0216^2 + 0,0044^2 + 0,0010^2 + 0,0409^2 + 0,0005^2 + 0,0293^2}$$

$$w_c = \% 0,0549$$

$\% 95$ güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$W = k \times w_c$$

$$W = k \times w_c = 2 \times 0,0549 = 0,1099$$

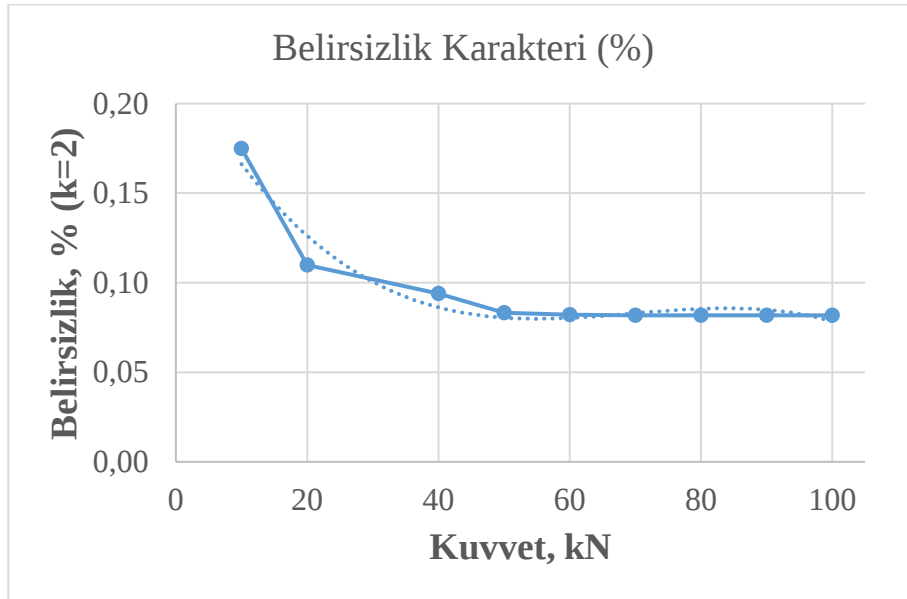
$$W = \% 0,109 \text{ olarak alınır.}$$

Kalibrasyon sertifikası için diğer basamaklarda benzer şekilde ölçüm belirsizliği parametreleri hesaplanmalıdır. Tüm kuvvet adımları için hesaplanmış ölçüm belirsizliği değerleri Tablo 4.19 verilmiştir.

Tablo 4.19. Tüm kuvvet basamakları için hesaplanmış ölçüm belirsizliği değerleri

Sınıfı	w_1 (%)	w_2 (%)	w_3 (%)	w_4 (%)	w_5 (%)	w_6 (%)	w_7 (%)	w_8 (%)	w_c (%)	W (%)
10	0,001	0,0443	0,0088	0,0021	0,0409	0,0005	0,000	0,0627	0,0875	0,1749
20	0,001	0,0216	0,0044	0,0010	0,0409	0,0005	0,000	0,0293	0,0549	0,1099
40	0,001	0,0115	0,0022	0,0005	0,0409	0,0005	0,000	0,0200	0,0470	0,0940
50	0,001	0,0037	0,0006	0,0004	0,0409	0,0005	0,000	0,0065	0,0416	0,0831
60	0,001	0,0025	0,0005	0,0003	0,0409	0,0005	0,000	0,0023	0,0410	0,0821
70	0,001	0,0012	0,0004	0,0003	0,0409	0,0005	0,000	0,0006	0,0409	0,0818
80	0,001	0,0009	0,0007	0,0003	0,0409	0,0005	0,000	0,0002	0,0409	0,0818
90	0,001	0,0003	0,0003	0,0002	0,0409	0,0005	0,000	0,0005	0,0409	0,0818
100	0,001	0,0002	0,0003	0,0002	0,0409	0,0005	0,000	0,0009	0,0409	0,0818

Ayrıca GOST R 55223 standardının Ek D kısmında belirsizlik değeri Şekil 4.18 de görüldüğü gibi grafik olarak ifade edilmiştir.



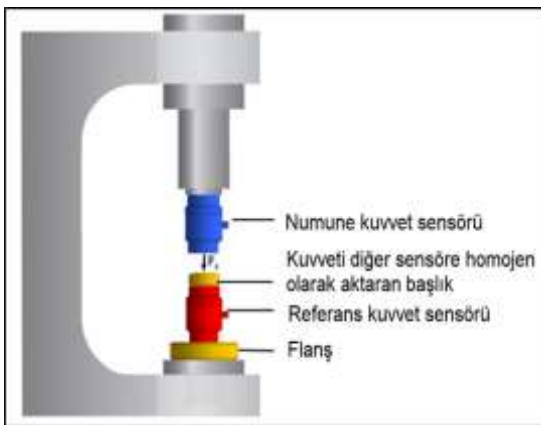
Şekil 4.18. Kuvvet değerlerine karşılık ölçüm belirsizliği değerleri

4.18. DKD-R 3-9'a Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu

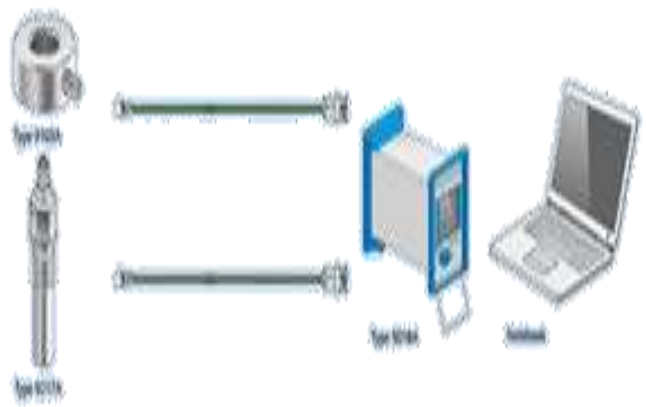
DKD-R 3-9 kılavuzunda kuvvet ölçüm cihazlarının sürekli kalibrasyon işlemini tarif eden bir yöntemdir. Cihazın ölçüm kapasitesine kadar rampa şeklinde zamana göre sürekli bir kuvvet değişimi tanımlanır. Bu yükleme şekli yarı statik olarak kabul edilebilir. Genellikle hızlı kuvvet değişimlerini algılama kabiliyeti yüksek olan piezo elektrik kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda tercih edilen bir yöntemdir.

Bir sensörün kalibrasyonu, sensörün çıkış sinyalinin referans sensörden gelen sinyalle karşılaştırılması ile gerçekleştirilir. Şekil 4.18'de yer verilen kalibrasyon düzeneğinden de görülebileceği gibi kalibrasyon sırasında, referans ve kalibre edilecek sensörler bilinen büyüklüklerde bir fiziksel kuvvete maruz kalırlar ve karşılık gelen çıkış değerleri kaydedilir. Referans sensör uluslararası alanda izlenebilir bir sertifikaya sahip olduğu için her noktadaki kuvvetin büyüklüğü kesin olarak bilindiğinden kalibre edilecek sensörün değerleri ile karşılaştırılabilir. Yönteme bağlı olarak sensörler, tüm ölçüm aralığında veya kısmi aralıkta; "tek noktada", "sürekli" veya "birkaç farklı noktada kademeli" olarak kalibre edilebilirler. Sürekli yöntem piezo elektrik kuvvet ölçme cihazları için en uygun kalibrasyon yöntemidir. Bu yöntemle kuvvet belirli bir süre içinde istenen değere sürekli olarak yükseltilir ve ardından aynı süre içinde tekrar sıfıra düşürülür.

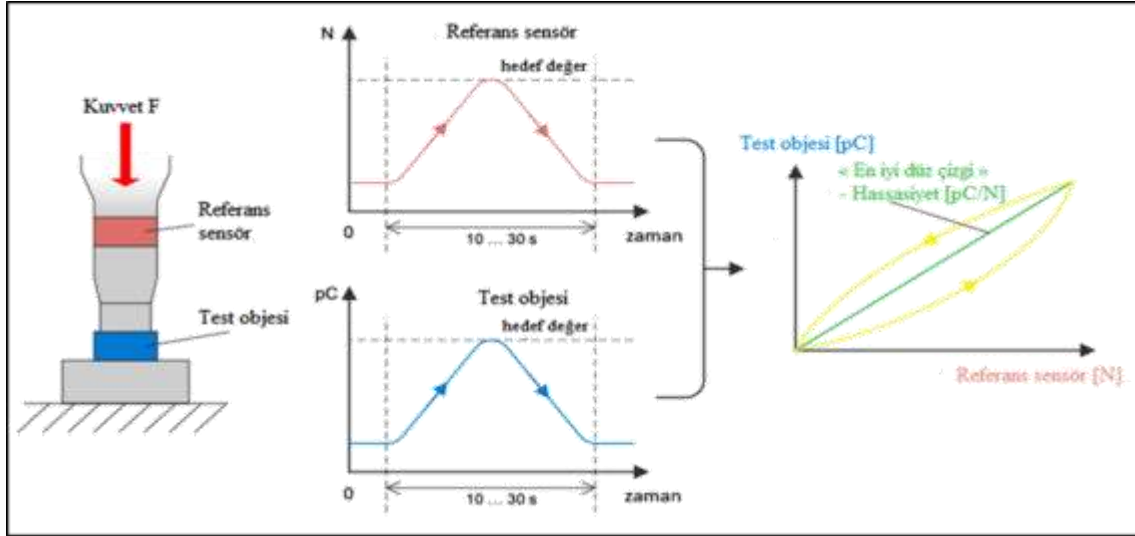
Elde edilen ölçüm noktalarından, matematiksel hesaplar ile orijinden geçen 'en iyi düz çizgi' denklemi elde edilir. Düz çizginin katsayısı, kalibre edilen sensörün ölçüm aralığında hassasiyetine karşılık gelir. Piezo elektrik kuvvet ölçme cihazını oluşturan ölçüm elemanları Şekil 12'de verilmektedir. Ayrıca bu cihazların karşılaştırma yöntemine göre sürekli kalibrasyonunun prensip şekli de Şekil 4.19'de görülmektedir.



Şekil 4.18. Piezo elektrik kuvvet sensörlerinin kalibrasyon düzeneği



Şekil 4.19. Piezo elektrik kuvvet ölçme cihazı ölçüm elemanları: sensör, şarj yükselticisi, bilgisayar



Şekil 4.20. Piezo elektrik kuvvet sensörlerinin karşılaştırma yöntemine göre sürekli kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi

Çevre Koşulları

Önemli çevre koşulları (çevre sıcaklığı, hava basıncı, bağıl hava nemi) gözlenmeli ve kalibrasyon belgesinde belirtilmelidir. Gerektiğinde ölçme belirsizliği bütçesinde dikkate alınmalıdır. İzin verilen sıcaklık aralığı, EN ISO 376 standarda uygun olarak 18 °C ila 28 °C olarak belirlenmiştir. Almanya'daki kalibrasyon laboratuvarları için 21 °C ± 2 °C arasındaki referans sıcaklık önerilmektedir. Bu açıklamanın nedeni, DKD dokümanları Almanya'daki laboratuvarlar için rehber olarak hazırlanmasıdır. Kalibrasyon süresince ölçüm düzeneği, termal dengede olmalı ve çevre sıcaklığı ise kalibrasyon cihazının bulunduğu pozisyonda ± 1 K'da stabil tutulmalıdır.

Kalibrasyon işlemi

Kalibrasyon öncesi kuvvet ölçme cihazı sıcaklık dengesi için açılmalı ve ortamda bekletilmelidir. Sürekli kalibrasyonun zaman avantajlarından yararlanmak için, kalibrasyon nesnelerinin ısınma süresinin monte edilmeden önce yardımcı besleme gerilimi uygulanarak sürekli bir kalibrasyona paralel olarak yürütülmesi tavsiye edilir. Üreticiler tarafından belirtilen ısınma sürelerine uyulmalıdır.

Temel olarak, kalibrasyon işlemi EN ISO 376, yani ön yükler ve montaj konumları standartta tarif edildiği gibi gerçekleştirilir (Şekil 4.21). Belirli koşullar altında bu işlemler kısaltılabilir. Kısaltma işlemi için ölçüm belirsizliği katkılarının belirlenmesi istenir. Eğer, EN ISO 376'da tarif edilenden daha az montaj pozisyonu ve ölçüm serisi yapılacaksa, yeterli sayıda aynı tipte bir ölçüm belirsizliği tahmini için tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik vb. gibi gerekli ölçüm faktörlerinin önceden bir ölçümün parçası olarak yapılmış olması gereklidir.

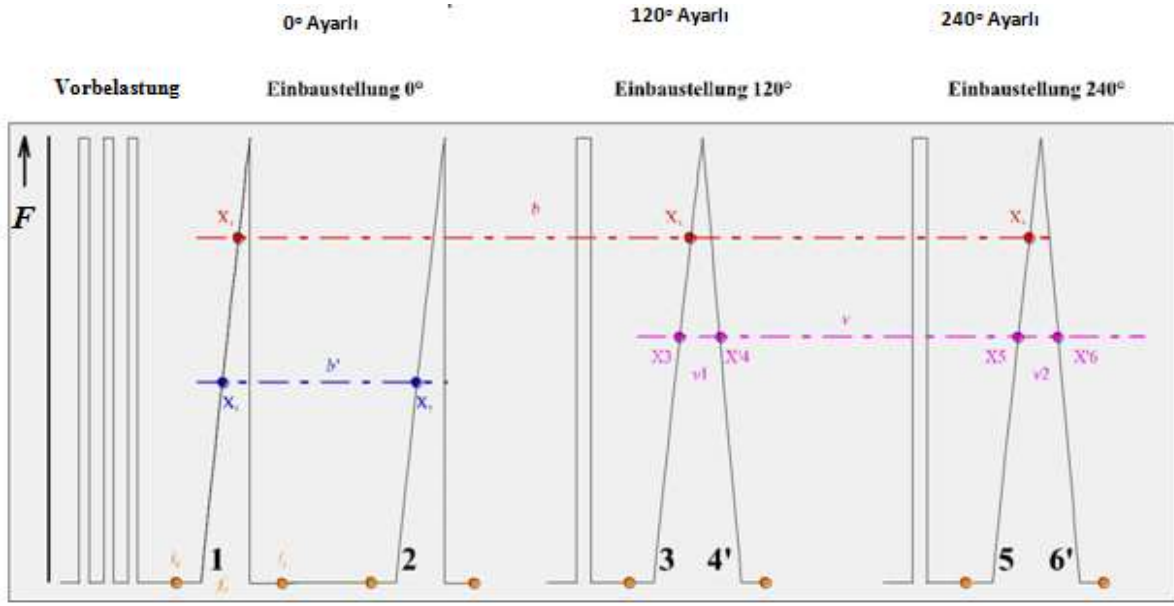
Kalibrasyon işlemlerinin parametreleri (yükleme hızı, örnekleme hızları, kalibre edilen cihazın kontrol ayarları, vb.) kalibrasyon laboratuvarının kalite dokümanlarında açıklanmalı ve talep üzerine kalibrasyon sertifikası ile birlikte verilmelidir.

Müşterinin isteği üzerine, kalibrasyon sertifikasına metod ve yükleme hızları ve gerekirse bekleme sürelerini içeren bilgilendirmeler oluşturulabilir. Bir grafik gösterimi de yararlı olabilir.

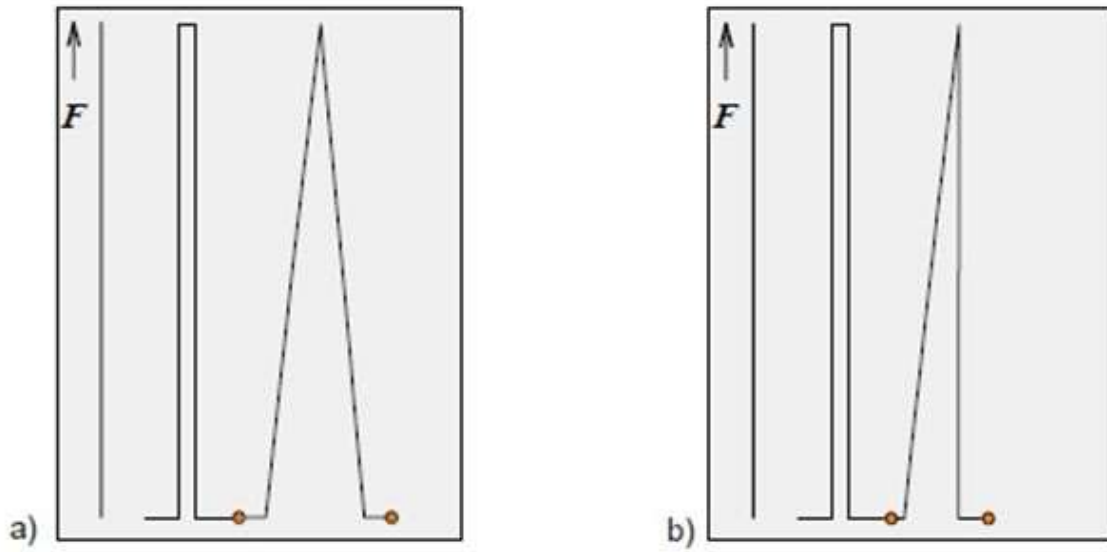
Kuvvet dönüştürücü hangi yönde kalibrasyon yapılacaksa ölçüme başlamadan önce 3 kez kalibrasyon yönünde ön yüklem yapılmalıdır. Her montajda ön yüklemeler tekrarlanmalıdır. Sıfır okuması yük boşaltıldıktan belirli bir süre sonra yapılmalıdır. İlk ön yük şartlandırma için kullanılır, örneğin, bağlantı aparatlarının kontrolü veya süreçlerini ayarlamak için olabilir. Diğer ön yükler ise, kalibrasyon kapasitesini değerlendirmek için kullanılabilir, örneğin, ölçülen değerlerin tekrarlanabilirliğini gözlemleyebilmek için olabilir. Ancak bu durum önyüklem serisi, ölçüm serisiyle aynı kalibrasyon işleminin parametreleri ile gerçekleştiriliyorsa mümkündür. Kalibre edilecek kuvvet ölçüm aralığı ile önyüklemde uygulanan kuvvet değerleri birbirini karşılamalıdır. İşleme bağlı olarak kalibrasyon ölçüm aralığının maksimum değeri yaklaşık % 3 kadar aşılabilir.

Şekil 4.21'te, EN ISO 376'ya göre gerçekleştirilebilecek sürekli kalibrasyon işlemi gösterilmektedir. Kalibrasyon ekipmalarına bağlı olarak bazı durumlarda şekilde gösterildiği gibi doğrusal rotalı olmayabilir. Ön yüklemelerin sayısı ve süresi de farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

Belirli koşullar altında kalibrasyon işlem, Şekil 15a verildiği gibi önyüklem ve artan ve azalan sıralı bir seri ölçüm şeklinde kısaltılabilir. Ya da Şekil 15b, verildiği gibi önyüklem ve artan bir seri ölçüm şeklinde en basit durumda kısaltılabilir. Ancak kısaltma arttıkça, bu kalibrasyon öncesinde yapılması gerekli olan bir tip testinde belirlenecek ölçüm belirsizliği bileşenlerinin sayısının arttığına da dikkat edilmelidir. Çünkü kısaltılmış metodlarda tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik ve tersinebilirlik gibi kısaltılmış bir işlemin ölçülen değerlerinden doğrudan belirlenememektedir. Kuvvet ölçme cihazlarının bu metod için tarif edilen tip testleri EN ISO 376'ya göre yapılabilir.



Şekil 4.21. DKD R 3-9 'a göre EN ISO 376'ya benzer sürekli kalibrasyon için kuvvet zaman grafiği



Şekil 4.22. DKD R 3-9 'a göre kısaltılmış sürekli kalibrasyon için kuvvet zaman grafikleri,
a) Artan ve azalan seri, b) Artan seri

Ölçülen Değerlerin Elde edilmesi

Kalibrasyondaki referans kuvvet F_{ref} ve ilişkili kalibre edilen cihazda oluşan değer çiftlerinin elde edilmesi ayırık zamana bağlı veya ayırık değerli şekilde olabilir. Ayırık zamana bağlı değer alımı, önceden belirlenmiş bir örnekleme frekansı ile (tipik olarak $N = 10.000$ ila 100.000 değer çifti) gerçekleşir. Ölçülen ayırık değerli veri alımı durumunda ise, değer çiftleri (tipik olarak $N = 100$ ila 500) tanımlanmış kuvvetlerde (ölçüm noktaları) kaydedilir. Bozucu etkiyi önlemek için uygun filtre ayarları seçilmelidir.

Değerlendirme

Değerlendirmenin kapsamı, hangi kalibrasyon prosedürünün seçildiğine bağlıdır. İşlem DKD R 3-9'agöre EN ISO 376'ya benzer yöntemde, kalibrasyonda elde edilen değer çiftlerinden ölçülen değerler, ölçüm belirsizliğinin hesaplanması ve değerlendirilmesi için gereken tüm bilgiler hazırlanır. Kısaltılmış kalibrasyon prosedürleri durumunda ise, ölçüm belirsizliğini tahmin etmek için kalibre edilen cihazın önceki kalibrasyonlarından ve/veya tip testlerinden gelen bilgiler gereklidir. Alınan değerlere göre denklem fonksiyonunun belirlenmesinde, EN ISO 376'ya göre yapılan değerlendirmeye benzer şekilde sadece artan yük ile ölçülen değerler kullanılarak hesaplanabileceği gibi, uygulamaya ve müşteri gereksinimlerine bağlı olarak, azalan yük ile ölçülen değerler veya her iki yükleme yönündeki ortalama değerler kullanılarak da hesaplanabilir.

Değerlendirme aşağıdaki adımları içerir:

1. İstenen ölçüm noktalarından Fref değerine karşılık interpolasyon noktalarını belirlemek için kalibre edilen cihazın çıkış sinyali (SKG) aşağıdakilerden bir yöntem belirlenmelidir.
 - a. Bitişik ölçülen değer çiftlerinin (SKG, Fref) doğrusal enterpolasyonu ile tespiti,
 - b. Ölçülen tüm değer çiftleri ile her montaj konumu için yükü artan ve azalan yönde ayrı ayrı ölçülen değer çiftlerine kompanzasyon fonksiyonlarını (daha yüksek derece) kullanarak belirleme (rastgele sapmaların azaltılması gerekiyorsa bu kompanzasyon işlevlerini belirleme hakkında daha fazla bilgi DKD R 3-9 Ek B vardır.)
 2. Tip testlerinden ölçüm belirsizliği katkılarının (örneğin tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik, tersinebilirlik) belirlenebilmesi için birkaç ölçüm serisi gerçekleştirildikten sonra, ölçülen değer çiftlerinden, EN ISO 376'ya benzer ortalama değerler ve ölçüm belirsizliği katkıları belirlenmelidir.
 3. Artan ve/veya azalan serinin ölçüm noktalarındaki değer çiftlerinden, tercihen birinci derece fonksiyonunun eğimi olarak en küçük kareler (Gauss) yöntemine göre sıfırdan geçen denklem katsayısı hesaplanmalıdır. EN ISO 376'a uygun bir şekilde, daha yüksek dereceli denklem katsayılarının belirlenmesi de mümkündür.
- Ayrıca 1. derece denklem kullanırken aşağıdaki maddeler de uygulanmalıdır.
4. Ölçüm noktalarındaki değer çiftleri, kendilerine atanacak genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri W , enterpolasyon sapmaları D_{inp} ve belirsizlik aralıklarını W' gösteren bir değer tablosu oluşturulmalıdır. Belirsizlik aralıkları W' değeri, ölçüm noktalarında genişletilmiş ölçüm belirsizliği ile enterpolasyon sapmasının toplamından oluşur.

5. Kalibrasyon aralığındaki belirsizlik aralıkları ve şartname limitleri ile iletim katsayısının gösterimi olmalıdır. İletim katsayısına (tek değer şartname limitleri) bir veya daha fazla kendi belirlenmiş şartname sınırları atanabilir. Şartname sınırlarının uygulandığı kuvvet aralığı belirtilmelidir.
6. İletim katsayısı (tek değer) ve şartname limitlerinden oluşan tam ölçüm sonucunun belirtilmesi gereklidir. (bu değer, belirsizlik aralığından daha büyüktür)

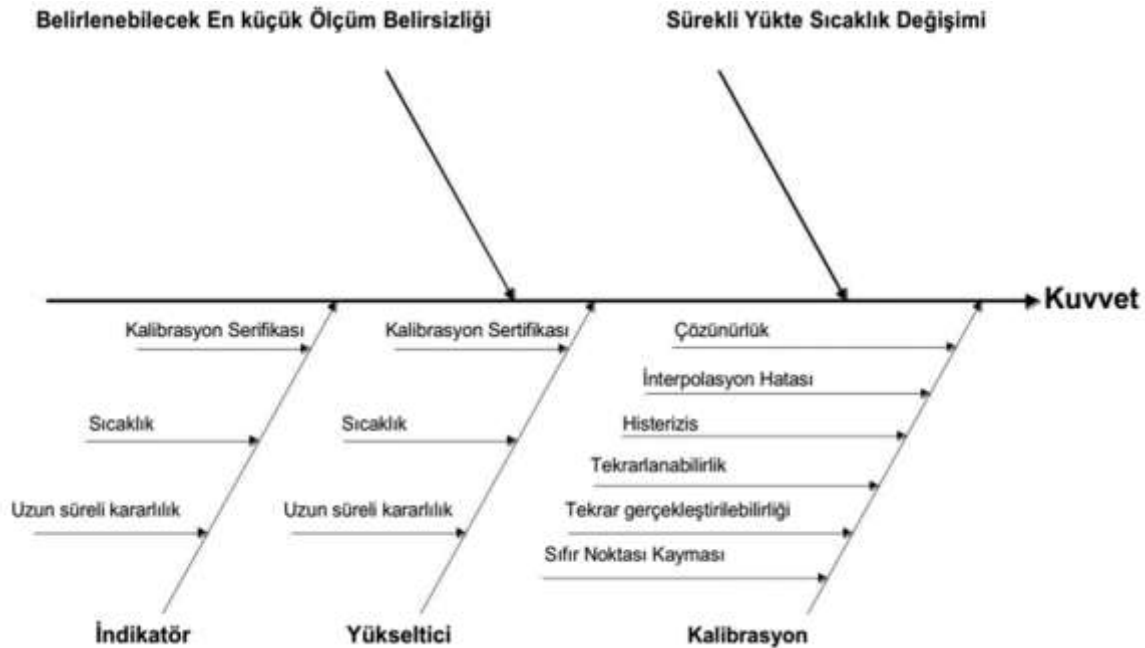
Kalibrasyonu yapılan cihazının üzerine etkiyen kuvvete bağlı olarak çıkış sinyaline alternatif olarak, örneğin EN ISO 376'ya benzer şekilde, bir değer çiftleri tablosu ile tanımlanabilir. Değer çiftleri, tek değer belirtimi yerine daha yüksek bir derecedeki dengeleme fonksiyonlarının kullanılmasına izin verir.

Adım 1b'den sonra polinom oluşumunun etkisini göstermek için DKD R 3-9 Ek B'de, bir transfer katsayısı olduğunda ortaya çıkan sonuçların bir karşılaştırması gösterilmektedir.

(Tek değer spesifikasyonu) Doğrudan kaydedilen değer çiftlerinden (Fref, SKG) ve Ek B'ye göre oluşturulan bir polinom kullanılarak rastgele sapmaların azaltılmasından sonra belirlenir.

4.19. DKD-R 3-9'a Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Kuvvet ölçme cihazlarının DKD R 3-9 dokümanında sürekli kalibrasyon kapsamındaki belirsizlik hesaplamaları tanımlanmıştır. Belirsizlik model fonksiyonu ve tüm belirsizlik parametreleri tanımlanmıştır. Şekil 4.23'da bir kuvvet ölçme cihazı için DKD R 3-9'a göre belirsizlik bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 4.23: Bir kuvvet ölçme cihazının ölçüm belirsizliği hesabındaki etken büyüklükler

Kuvvet ölçme cihazlarının sürekli kalibrasyonu sonucunda belirsizlik hesaplamalarında DKD R 3-9 dokümanına göre iki model tanımlanmıştır. Bunlar:

1. “Transfer katsayılı” model
2. “Kuvvet” model (3. dereceden Polinom katsayılı, EN ISO 376’ya göre)

olarak tanımlanır. Bu modellere göre belirsizlik hesabı aşağıda tek tek ele alınmıştır.

“Transfer katsayılı” modele göre belirsizlik hesabı

“Transfer katsayılı” model yöntemine göre kuvvet kalibrasyonların da belirsizlik modeli aşağıda (17) numaralı eşitlikteki gibidir.

$$E_{KG} = \frac{V_{Anz} / (G \cdot V_{Sp})}{F_{bmc,kont}} \cdot \prod_{i=1}^5 K_i \quad (17)$$

Bu denklemde;

$$\prod_{i=1}^5 K_i = K_T \cdot K_{zer} \cdot K_{rep} \cdot K_{rot} \cdot K_{rev} \quad (18)$$

ile gösterilir. Bu eşitlikte kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

E_{KG} : Çıkış büyüklüğü, Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensörünün transfer katsayısı veya hassasiyet değeri,

V_{Anz} : Göstergeden okunan gerilim değeri,

G : Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensörünün şarj yükselticisinin kazanım katsayısı,

V_{Sp} : Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensörünün besleme gerilimi,

$F_{bmc,kont}$: Referans kuvvet değeri,

K_T : Sürekli yükte bağlı sıcaklık değişimi için düzeltme faktörü,

K_{zer} : Sıfır yükte bağlı değişim için düzeltme faktörü,

K_{rep} : Tekrarlanabilirlik bağlı değişimi için düzeltme faktörü,

K_{rot} : Tekrar gerçekleştirilebilirlik bağlı değişimi için düzeltme faktörü,

K_{rev} : Tersinebilirlik bağlı değişim için düzeltme faktörü.

Belirsizlik yaklaşımında doğrusal model kullanılması ve bağlı ölçüm belirsizliğinin uygulanması nedeniyle, belirsizlik hesabında yer alan duyarlılık veya hassasiyet katsayıları 1 olarak hesaba konacaktır. Buna göre; ölçüm sonucuna etki eden her bir bağlı belirsizlik bileşeninin $w_i(y)$, karelerinin karekökleri alınarak ölçümün standart bağlı ölçüm belirsizliği aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$w(E_{KG}) = \sqrt{w^2(V_{Anz}) + w^2(G) + w^2(V_{Sp}) + w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{rev})} \quad (19)$$

Kuvvet sensörlerinin “Transfer katsayılı” model yöntemine göre sürekli kalibrasyonunun belirsizlik modeli kapsamında, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyansları ise aşağıda Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 4.15. Belirsizlik değişkenleri, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyanslar

Değişken	Dağılım	Bağıl Varyans $w(x_i)$
Göstergede okunan voltaj değerindeki değişmeden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(V_{Anz})$ Sertifikadan Alınır
Şarj yükselticisinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(G)$ Sertifikadan Alınır
Kuvvet sensörünün besleme gerilimindeki değişimden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(V_{Sp})$ Sertifikadan Alınır
Referans kuvvet değerinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(F_{bmc,kont})$ Sertifikadan Alınır
Sürekli yükte sıcaklık değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3}$
Kuvvet sensörünün sıfır yükteki değerinin değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrarlanabilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrar gerçekleştirilebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	U Dağılımı	$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$
Kuvvet sensörünün tersinebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$

“Kuvvet” modeline göre belirsizlik hesabı

“Kuvvet” model yöntemine göre kuvvet kalibrasyonlarında belirsizlik modeli aşağıda (20) numaralı eşitlikteki gibidir.

$$F_{KG} = F_{bmc,kont} \cdot \prod_{i=1}^8 K_i \quad (20)$$

Bu denklemde;

$$\prod_{i=1}^8 K_i = K_T \cdot K_{anp} \cdot K_{anz} \cdot K_{zer} \cdot K_{rep} \cdot K_{rot} \cdot K_{inp} \cdot K_{rev} \quad (21)$$

ile gösterilir.

Bu eşitlikte kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

F_{KG} : Çıkış büyüklüğü, Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensöre etkiyen kuvvet değeri

$F_{bmc,kont}$: Referans kuvvet değeri

K_T : Sürekli yükte bağıl sıcaklık değişimi için düzeltme faktörü

K_{anp} : Adaptör için düzeltme faktörü

K_{anz} : Gösterge için düzeltme faktörü

K_{zer} : Sıfır yükte bağıl değişim için düzeltme faktörü

K_{rep} : Tekrarlanabilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{rot} : Tekrar gerçekleştirilebilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{inp} : Enterpolasyon hatası bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{rev} : Tersinebilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

Belirsizlik yaklaşımında bağıl ölçüm belirsizliğinin kullanılması nedeniyle, belirsizlik hesabında yer alan duyarlılık veya hassasiyet katsayıları 1 olarak hesaba konacaktır. Buna göre; ölçüm sonucuna etki eden her bir bağıl belirsizlik bileşeninin $w_i(F_{KG})$, karelerinin karekökleri alınarak ölçümün standart bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (22) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

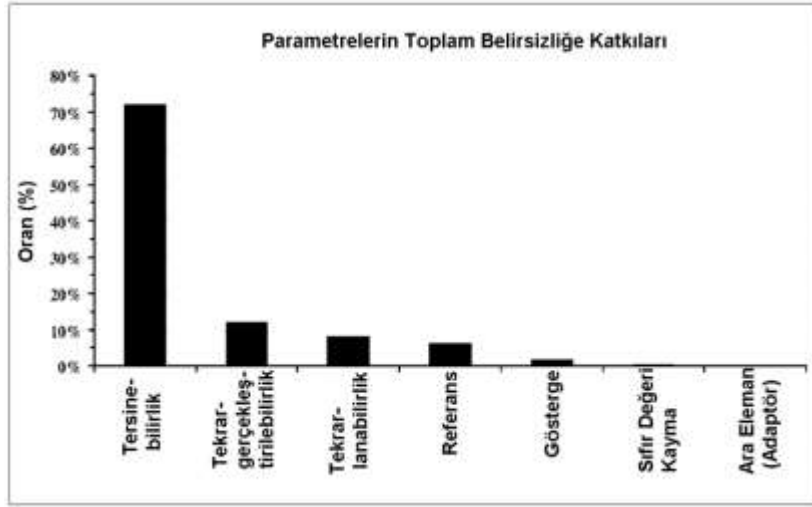
$$w(F_{KG}) = \sqrt{w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{anp}) + w^2(K_{anz}) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{inp}) + w^2(K_{rev})} \quad (22)$$

Kuvvet sensörlerinin “kuvvet” modeli yöntemine göre sürekli kalibrasyonunun belirsizlik modeli kapsamında, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyansları ise Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.16. Belirsizlik değişkenleri, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyanslar

Değişken	Dağılım	Bağıl Varyans $w(x_i)$
Referans kuvvet değerinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(F_{bmc, kont})$ Sertifikadan Alınır
Sürekli yükte sıcaklık değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3}$
Adaptör değişiminden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(K_{anp})$ Sertifikadan Alınır
Gösterge sistemi bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(K_{anz})$ Sertifikadan Alınır
Kuvvet sensörünün sıfır yükteki değerinin değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrarlanabilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrar gerçekleştirilebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	U Dağılımı	$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$
Kuvvet sensörünün interpolasyon hatası kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Üçgen	$w^2(K_{inp}) = \frac{a_{inp}^2}{6}$
Kuvvet sensörünün tersinebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$

Kuvvet sensörlerinin sürekli kalibrasyonunun ölçüm belirsizliği hesabında etkin olan parametrelerin grafiksel gösterimi aşağıda Şekil 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.24. Sürekli kalibrasyondaki belirsizlik parametrelerinin toplam ölçüm belirsizliğine etkilerinin grafiksel gösterimi

Şekil 4.24’de yer alan parametrelerin kalibrasyonun toplam belirsizliğine etkisi incelendiğinde, tersinebilirlik parametresinden kaynaklı bağıl belirsizlik bileşeninin toplam ölçüm belirsizliği yaklaşımının % 70’ini kapsamakta olduğu ve kalibrasyon belirsizlik bütçesindeki baskın değişkeni oluşturduğu görülmektedir. Öte yandan sensörün ölçümdeki farklı konumlarından kaynaklı tekrar gerçekleştirilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği değişkeni toplam ölçüm belirsizliğinin % 12’sini, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği değişkeni toplam ölçüm belirsizliğinin % 8’ini, kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazından ve göstergeden kaynaklı bağıl ölçüm belirsizliği değişkenleri ise toplam ölçüm belirsizliğinin sırasıyla % 5 ve % 2,5’ini oluşturmaktadır. Kalibrasyonu yapılan sensörün sıfır değerindeki kaymadan ve ölçüm düzeneğinde kullanılan aparatlardan kaynaklı bağıl belirsizlik değişkenlerinin toplam ölçüm belirsizliği bütçesine etkisinin son derece düşük olduğu yukarıdaki grafikten görülebilmektedir.

Bağıl belirsizlik değerleri kullanılarak birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliği, karelerinin toplamının karekökü olarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2}$$

% 95 güvenirlik seviyesi için kapsam faktörü ($k=2,0$) alınır, bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$U = k \cdot w_c$$

Belirsizliğin Raporlanması

Kuvvet ölçme cihazlarının sürekli kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, yukarıda verilen formüller kullanılarak belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır. Hesaplanan belirsizlik değerleri ölçüm noktalarına göre sertifikada raporlanır. DKD-R 3-9 dokümanında verilen aşağıdaki Tablo 4.17 formatında raporlanması daha uygun olur.

Tablo 4.17. DKD-R 3-9'e göre verilen sonuçların raporlanması tablosu

Kuvvet Değeri	Ölçümü Yapılan Sensörün Duyarlılığı	Ölçümün Bağıl Genişletilmiş Belirsizliği	Ölçümün Bağıl Enterpolasyon Hatası	Belirsizlik Aralığı
$F_{ref,i}$	S_{KG}	W	D_{inp}	W'

4.20. DKD-R 3-9'a Göre Belirsizlik Hesabının Sayısal Uygulaması

Kuvvet ölçme cihazının, DKD R 3-9 dokümanına uygun olarak EN ISO 376 standardına benzer şekilde yükleme uygulanarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 4.18'de verilmiştir.

Kalibrasyon EN ISO 376 standardına benzer şekilde yapıldığı için belirsizlik hesaplamasında kuvvet modeli yaklaşımı esas alınacaktır.

Tablo 4.18. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Nominal Kuvvet Değerleri	0° Konum		120° Konum	240° Konum
	1. Seri	2. Seri	3. ve 4. Seri	5. ve 6. Seri
kN	pC	pC	pC	pC
0	0	0	0	0
1	-3902	-3905	-3913	-3893
2	-7806	-7809	-7794	-7765
3	-11696	-11700	-11725	-11686
4	-15582	-15585	-15608	-15597
5	-19504	-19507	-19496	-19506
6	-23399	-23402	-23408	-23438
7	-27345	-27348	-27356	-27367
8	-31275	-31277	-31304	-31269
9	-35185	-35189	-35218	-35197
10	-39140	-39143	-39154	-39174
9			-35165	-35187
8			-31221	-31212
7			-27270	-27271
6			-23384	-23295
5			-19465	-19454
4			-15504	-15528
3			-11632	-11591
2			-7741	-7736
1			-3867	-3840
0	-2	-3	-1	-2

Tablo 4.18’de yer alan 4 kN kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır.

Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının sürekli kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının belirsizlik değeri için DKD R 3-9 dokümanının Ek A kısmında aşağıda verilen tabloda belirtilmiştir. Bu tabloya uygun referans kuvvet dönüştürücülerin kullanılması istenmektedir.

Tablo 4.19. Referans ve transfer kuvvet dönüştürücü belirsizlik değerleri için öneriler

Tip	$W_{bmc,kont}$	Kuvvet Kalibrasyon Makinasının Referans Kuvvet Dönüştürücüsü		Transfer Kuvvet Dönüştürücüsü
		Minimum sınıflandırma EN ISO 376 göre	W_{ref}	W_{tsd}
A	$0,10 \% \leq W \leq 0,25 \%$	00	$W \leq 0,06 \%$	$W \leq 0,04 \%$
B	$0,25 \% < W \leq 0,5 \%$	0,5	$W \leq 0,12 \%$	$W \leq 0,08 \%$
C	$0,5 \% < W$	1	$W \leq 0,24 \%$	$W \leq 0,16 \%$

Bu örnek için, referans kuvvet değerinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni değeri ($W_{Fbmc,kont}$) % 0,1 (k=2 için) olarak alınmıştır. Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni ($w_{Fbmc,kont}$), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w(F_{bmc,kont}) = \frac{W_{bmc,kont}}{2} = \frac{0,1}{2}$$

$w(F_{bmc,kont}) = \% 0,05$ olarak ve $w^2(F_{bmc,kont}) = \% 0,0025$ olarak bulunur.

Sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_{KT}) için, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonundaki sıcaklık değişimi $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşmadığı ve sıcaklık değişim katsayısının (K) da $0,0015 \% / \text{C}$ alındığında aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

$$w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3} = \frac{(K \cdot \Delta T)^2}{3} = \frac{(100 \cdot 0,0015 \cdot 0,5)^2}{3}$$

$w^2(K_T) = \% 0,0019$ olarak bulunur.

Adaptör değişiminden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni $w^2(K_{anp})$ ve gösterge sistemi bağıl belirsizlik değişkeni $w^2(K_{anz})$ değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır. Bu örnek için, bu parametrelerin sertifikada verilen belirsizlik değerleri % 0,02 olarak verilmiştir.

$$w(K_{anp,anz}) = \frac{W_{anp,anz}}{2} = \frac{0,02}{2}$$

$w(K_{anp}) = w(K_{anz}) = \% 0,01$ olarak ve $w^2(K_{anp}) = w^2(K_{anz}) = \% 0,0001$ olarak bulunur.

Kuvvet sensörünün sıfır yükteki değerinin değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni $w^2(K_{zer})$, hesabı için, sıfır değeri kayma hatasının maksimum değeri hesaplanmalıdır. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler yapılır;

$$a_{zero\ max} = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100 = \frac{-3 - 0}{-39143} \cdot 100 = 0,0077\%$$

$$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3} = \frac{0,0077^2}{3}$$

$w^2(K_{zer}) = \% 0,00002$ olarak bulunur.

Kuvvet sensörünün tekrarlanabilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik bileşeninin $w^2(K_{rep})$ hesabında, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz gösterge değerlerinin ortalama değeri ($\bar{x}_{wr}$), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{x}_{wr} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{-15582 + (-15585)}{2} = -15583,5$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası değeri (a_{rep}) aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$a_{rep} = \frac{|x_2 - x_1|}{\bar{x}_{wr}} \cdot 100 = \frac{|-15585 + (-15582)|}{-15583,5} \cdot 100 = -0,0187\%$$

Böylece, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{rep})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3} = \frac{(-0,0187)^2}{3}$$

$w^2(K_{rep}) = \% 0,00012$ olarak bulunur.

Kuvvet sensörünün tekrar gerçekleştirilebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik bileşeninin $w^2(K_{rot})$ hesabında, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri ($\bar{x}_r$), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{x}_r = \frac{x_1 + x_3 + x_5}{3} = \frac{-15582 + (-15608) + (-15597)}{3} = -15595,7$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümlü bağıl tekrarlanabilirlik veya tekrar gerçekleştirilebilirlik hatası değeri (a_{rot}) aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$a_{rot} = \left| \frac{x_{max} - x_{min}}{\bar{x}_r} \right| \cdot 100 = \left| \frac{(-15582) - (-15608)}{(-15595,7)} \right| \cdot 100 = 0,1651 \%$$

Böylece, tekrarlanabilirlik hatası bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{rot})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{3} = \frac{(0,1651)^2}{2}$$

$w^2(K_{rot}) = \% 0,01363$ olarak bulunur.

Kaynaklarda [6] ve [7] numaralı dokümanlarda, hesaplama yapılarak bulunmuş cihaz gösterge değerinin (X_a) ayrıntılı olarak matematiksel çıkarımı ifade edilmektedir. Bu örnekte (X_a) değeri için -15599,1 pC kullanılarak kuvvet sensörünün enterpolasyon hatası değeri (a_{int}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a_{int} = \left| \frac{\bar{x}_r - x_a}{x_a} \right| \cdot 100 = \left| \frac{(-15595,7) - (-15599,1)}{(-15599,1)} \right| \cdot 100 = 0,0220 \%$$

Böylece, enterpolasyon hatası bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{int})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{int}) = \frac{a_{int}^2}{6} = \frac{(0,0220)^2}{6}$$

$w^2(K_{int}) = \% 0,0008$ olarak bulunur.

Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin $w^2(K_{rev})$ hesabında, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için bağıl tersinebilirlik hatası (a_{v1} , a_{v2} , a_{rev}) ifadelerinin, aşağıdaki gibi hesaplanması gerekmektedir.

$$a_{v1} = \left| \frac{x_4' - x_3}{x_3} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-15504 - (-15608)}{(-15608)} \right| \cdot 100 = 0,667 \%$$

$$a_{v2} = \left| \frac{x_6' - x_5}{x_5} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-15528 - (-15597)}{(-15597)} \right| \cdot 100 = 0,441 \%$$

$$a_{rev} = \frac{a_{v1} + a_{v2}}{2} = \frac{0,667 + 0,441}{2} = 0,554 \%$$

Böylece, tersinebilirlik hatası bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{int})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{int}^2}{6} = \frac{(0,554)^2}{6}$$

$w^2(K_{rev}) = \% 0,1023$ olarak bulunur.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak birleştirilmiş belirsizlik aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2} = \sqrt{w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{anp}) + w^2(K_{anz}) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{inp}) + w^2(K_{rev})}$$

$$w_c = \sqrt{0,0025 + 0,0019 + 0,0001 + 0,0001 + 0,00002 + 0,00012 + 0,1363 + 0,0008 + 0,1023}$$

$w_c = \% 0,348$ olarak bulunur.

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$U = k \cdot w_c = 2 \cdot 0,348$$

$W = \% 0,696$ olarak bulunur.

Kalibrasyon sertifikası için diğer kuvvet basamakları da benzer şekilde hesaplanmalı ve en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20'si ile % 100'ü arasında belirlenirse bu cihaza 2 kN ile 10 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri sertifikada cihazın belirsizlik değeri olarak beyan edilir.

Örneğin: 2 kN - 10 kN ölçüm aralığı için $\pm \% 0,696$ ölçüm belirsizliğidir.

Ayrıca DKD-R 3-9 dokümanında verilen yukarıda verilen Tablo 4.20 formatında sonuçların raporlanması uygun olacaktır.

Tablo 4.20. DKD-R 3-9'a göre verilen sonuçların raporlanması örnek tablosu

Kuvvet Değeri	Ölçümü Yapılan Sensörün Duyarlılığı	Ölçümün Bağıl Genişletilmiş Belirsizliği	Ölçümün Bağıl Enterpolasyon Hatası
$F_{ref,i}$	S_{KG}	W	D_{inp}
N	pC/N	%	%
4000	-3,899	0,695	0,022

Bu tabloda verilen S_{KG} değeri aşağıdaki formül yardımı ile belirlenir.

$$S_{KG} = \frac{X_r}{F_{ref}} = \frac{-15595,7}{4000} = -3,899 \text{ pC/N}$$

olarak hesaplanarak tabloda verilir.

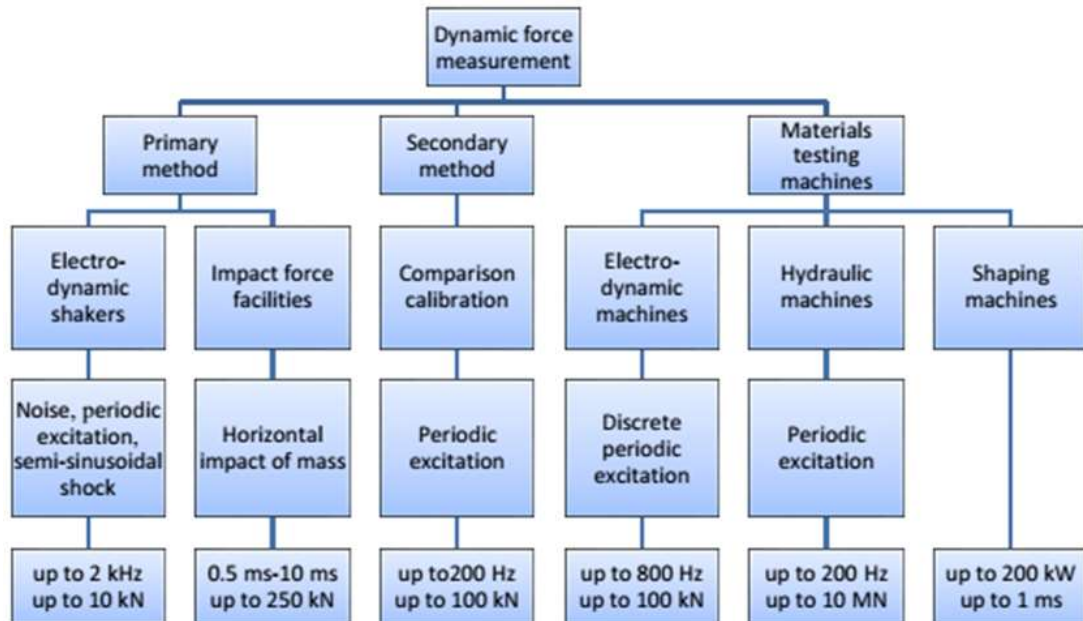
4.21. DKD-R 3-10'a Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kuvvet Kalibrasyonu

DKD-R 3-10 dokümanları kuvvet ölçüm cihazları ve malzeme test makinalarının dinamik kalibrasyon işlemlerini tarif eder. DKD-R 3-10 dokümanları olarak 3 adet dokümana ulaşılır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- DKD-R 3-10 Sheet 1. Tek eksenli kuvvet ölçme cihazları ve test makinalarının dinamik kalibrasyonu (temel prensipler) - Dynamic calibration of uniaxial force measuring devices and testing machines (basic principles)
- DKD-R 3-10 Sheet 2. Kuvvet dönüştürücülerin sinüzoidal metoda göre dinamik kalibrasyonu - Dynamic calibration of force transducers according to the sinusoidal method
- DKD-R 3-10 Sheet 3. Malzeme test makinalarının uygulama örnekleri kullanılarak dinamik doğrulaması - Dynamic verification of material testing machines using applied samples

DKD-R 3-10 Sheet 1 dokümanı kuvvet ölçüm cihazlarının dinamik kalibrasyonunu ele alır. Bu başlık altındaki bilgiler DKD-R 3-10 Sheet 1 dokümanı esas alınarak hazırlanmıştır. Dinamik kuvvet uyarımı, bir adım veya şok şeklinde uyarma ile periyodik olarak (örneğin, sinüzoidal olarak) gerçekleştirilebilir. Dinamik bir kalibrasyon isteniyorsa, ek olarak, daha düşük bir ölçüm belirsizliğine sahip EN ISO 376'ya göre statik bir kalibrasyon ile desteklenmesi istenir.

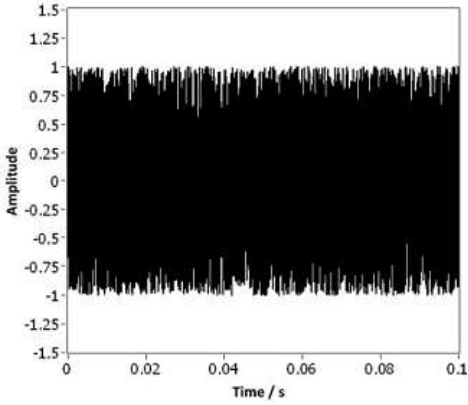
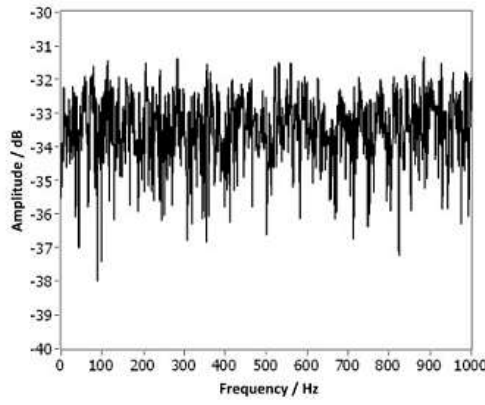
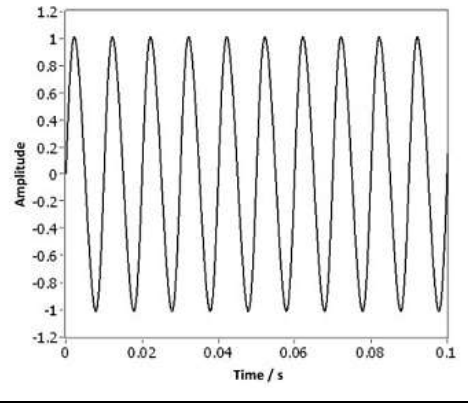
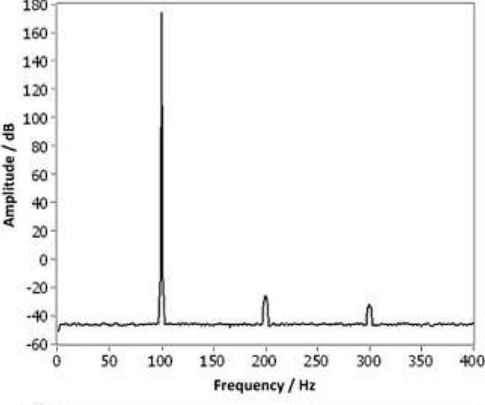
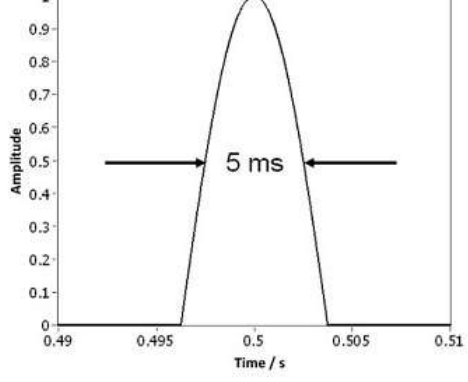
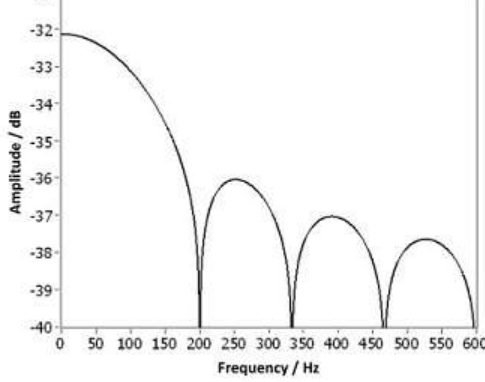
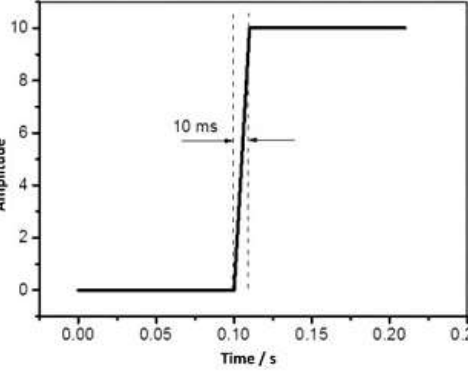
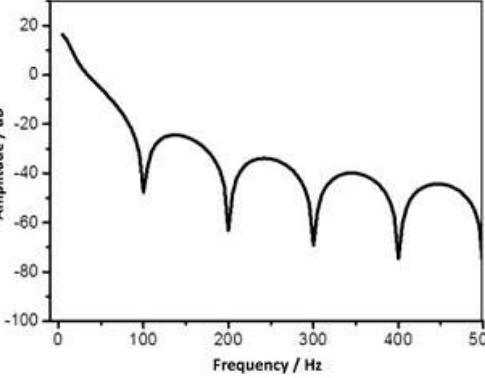
Dinamik kalibrasyon için farklı yöntemler tanımlanmıştır. Bu yöntemler ve genel prensipleri aşağıda hem kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu hem de malzeme test makinalarının dinamik kuvvet kalibrasyonları için verilmiştir. Ancak öncelikle dinamik kuvvet tipleri ve sınıflandırmaları DKD-R 3-10 Sheet 1 dokümanına göre gösterilmiştir. Kalibrasyon ve test için dinamik kuvvet uygulamalarının sınıflandırılması aşağıdaki şekildedir.



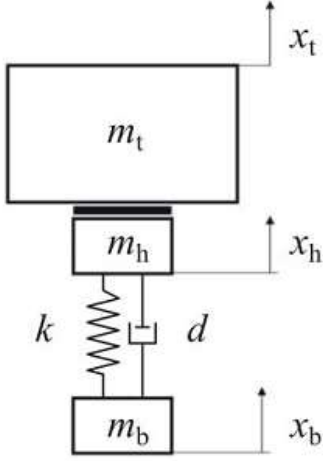
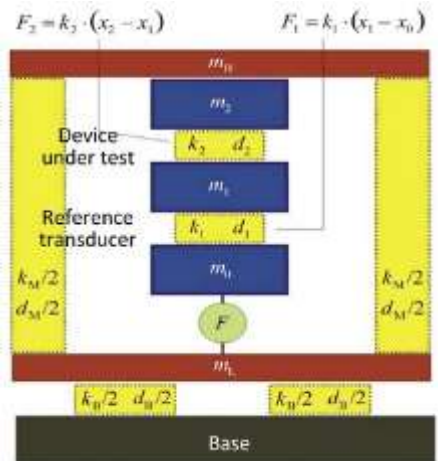
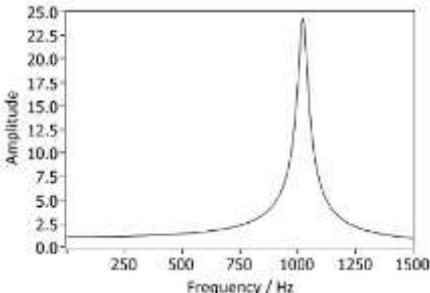
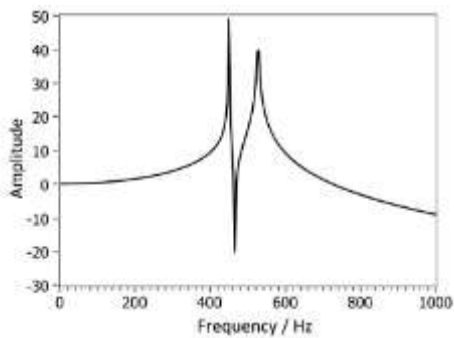
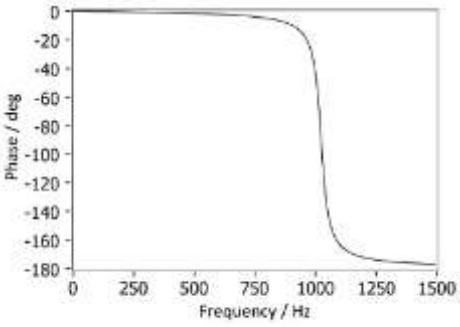
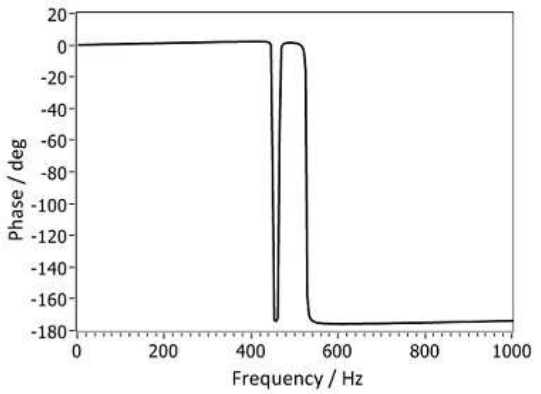
Şekil. 4.25. Kalibrasyon ve test için dinamik kuvvet uygulamalarının mevcut teknolojiye göre sınıflandırılması

Dinamik kuvvet besleme veya uyarı şekilleri aşağıdaki Tablo 4.21'deki gibi farklı tiplerde ifade edilebilir. Birincil ve ikincil yöntemle göre sınıflandırma ise Tablo 4.22'de verilmiştir.

Tablo 4.21. Dinamik kuvvet besleme(uyarı) tipleri ve şekilleri

Kuvvet uyarı tipi	Zamana bağlı	Frekansa bağlı
Gürültü		
Sinüs		
Şok		
Basamak		

Tablo 4.22. Birincil ve ikincil yönteme göre sınıflandırma

	Birincil Metod	İkincil Metod
	Birincil metodlarla izlenebilir kuvvet ölçümü (tek taraflı kuvvet girişi, örneğin sinüs, çok)	Bir referans kuvvet d�n���t�r�c� vasıtasıyla izlenebilirlik (mekanik bağlı, dinamik olarak yüklenmiş kuvvet d�n���t�r�c�, örneğin, malzeme test makinasındaki referans d�n���t�r�c� ile)
Model		
Transfer fonksiyonunun genlik cevabı	 Ratio of the acceleration amplitudes $S_{bt} = \frac{\ddot{x}_b}{\ddot{x}_t}$	 Force amplitude of the device under test (damping neglected): $F_2 = k_2 \cdot (x_2 - x_1)$ $= F_1 + m_1 \cdot \ddot{x}_1$
Transfer fonksiyonunun faz cevabı	 $\phi = \phi(\ddot{x}_b) - \phi(\ddot{x}_t)$	 $\phi = \phi(F_2)$

Dinamik kuvvet kalibrasyonları incelendiğinde sinüzoidal ve darbeli kuvvetlerin büyük öneme sahip oldukları görülür. Zaman ve frekans açısından farklı bu uyarılar, dinamik kuvvet ölçümü alanındaki çeşitliliğini bir şekilde kapsamayı mümkün kılar.

Sinüs kuvvet kalibrasyonu sırasında, sinüzoidal kuvvetler kalibre edilecek kuvvet transdüserine etki eder. Referans sinyale bağlı genlikler ve fazlar dinamik kalibrasyon sonucu olarak değerlendirilir. Kalibrasyon sırasında, dönüştürücünün mümkün olan en geniş frekans aralığında davranışını karakterize etmek için farklı frekanslardaki sinüs uyarıları sırayla uygulanır.

Şok kalibrasyonunda ise, tanımlanmış genlik, süre ve şekildeki kuvvet darbeleri, kalibre edilecek kuvvet dönüştürücüsüne etki eder. Çıkış sinyalinin ve giriş kuvvetinin darbe yüksekliklerinin oranı tipik bir kalibrasyon sonucudur, ancak daha yakından incelendiğinde kuvvet darbesinin süresine ve şekline bağlıdır.

Birincil kalibrasyon

Özellikle hızlanan kütleler vasıtasıyla ölçüm kuvvetinin belirli bir şekilde üretildiği yöntemler dinamik birincil kalibrasyon için uygundur. Newton'un ikinci yasasına göre, hızlandırılmış bir kütlenin atalet kuvveti F kütle ve ivme yardımıyla hesaplanır, $F(t) = m \cdot a(t)$, m kütle sabittir ve $a(t)$ ivme zamana bağlıdır. Dolayısıyla dinamik kuvvetin izlenebilirliği, m (tartım yoluyla) kütle değerinin ve $a(t)$ zamana bağlı ivme eğrisinin (ivme sensörleri vasıtasıyla) belirlenmesini gerektirir. İvmelenme ölçümü, optik yöntemlerle (örneğin lazer vibrometreler vasıtasıyla) ve mekanik olarak temas eden sensörler kullanılarak gerçekleştirilebilir.

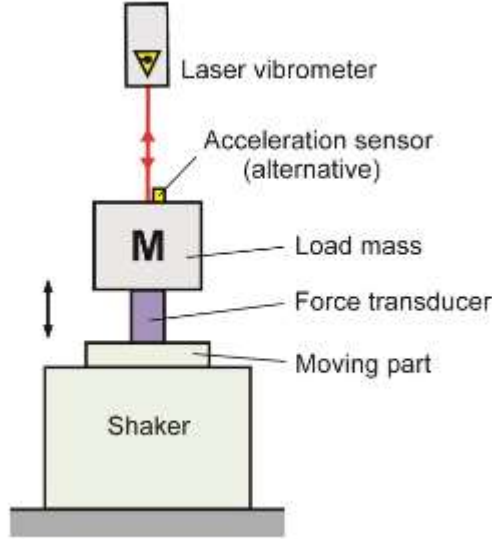
Sinüzoidal ve şok kuvvetlerinin dinamik birincil kalibrasyonu için yöntemler ulusal metroloji enstitülerinin güncel araştırma faaliyetlerinde yer almaktadır. Buradaki amaç, ivmeölçerlerin kalibrasyonuna göre, farklı yöntemlerin ve ölçüm cihazlarının ölçüm sonuçlarını parametrik modelleme yoluyla birbirlerine aktarılabilir hale getirmektir.

Örneğin, regresyon yoluyla kalibrasyon sırasında belirlenen kuvvet dönüştürücülerinin model parametreleri, herhangi bir uygulamada bir kuvvet dönüştürücüsünün dinamik ölçüm davranışını tarif etmeyi mümkün kılacaktır.

Sinüzoidal yük

Sinüsoidal kuvvetlerle birincil kalibrasyon için bir yöntemin temel prensibi Şekil 19'da gösterilmektedir. Bir titreştirici (shaker), titreştirici üstüne bağlı olan kalibre edilecek kuvvet dönüştürücüsünün periyodik bir temel yer değiştirmesini üretir. Dönüştürücünün üst tarafına takılan yük kütlesi M , istenen dinamik giriş miktarını temsil eden bir atalet kuvveti üretir.

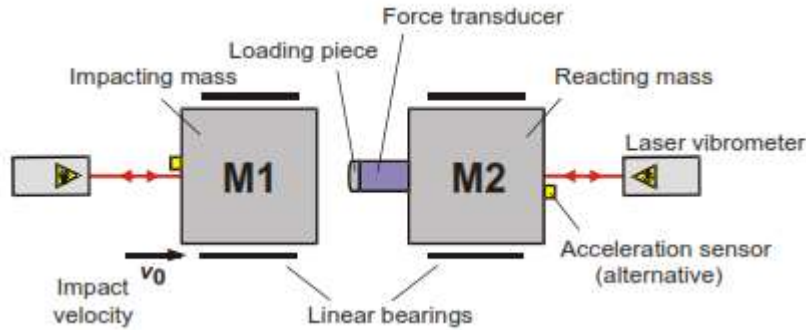
Sinüzoidal kuvvetlerle dinamik kuvvet kalibrasyonu hakkında daha fazla bilgi için DKD R 3-10 Sheet 1'i inceleyebilirsiniz.



Şekil 4.26. Sinüzoidal kuvvetlerle birincil kalibrasyonun temel prensibi

Şok yük

Şok kuvvetleri ile birincil kalibrasyon için yöntemin temel prensibi Şekil 4.27 de gösterilmiştir. İki kütle gövdesi çarpışmaya uygun hale getirilir, kalibre edilecek kuvvet dönüştürücüsü aralarına monte edilir. Doğrusal bir tahrik tarafından istenen darbe hızına çıkarılan M1 kütle gövdesi, başlangıçta hareketsiz olan M2 kütle gövdesi tutturulmuş kuvvet dönüştürücüsünü darbe yaparak etkiler. Darbe sırasında, etki itilen gövdeye iletilir ve oluşan atalet kuvvetleri sensörler vasıtasıyla ölçülür. Dinamik kuvvetin izlenebilirliği hızlanma (ivmelendirme) ölçümü (örn. lazer vibrometreler veya ivmelenme sensörleri) aracılığıyla sağlanır.



Şekil 4.27: Şok kuvvetleri ile birincil kalibrasyonun temel prensibi

Sinüzoidal ve şok kalibrasyonu karşılaştırıldığında, şok metodları yüksek kuvvet genlikleri için çok uygun olduğu söylenmelidir. Çünkü sinüzoidal uyarılma durumunda gerçekleştirilemeyecek kadar büyük kütlelere veya yer değiştirmelere ihtiyaç olmaktadır.

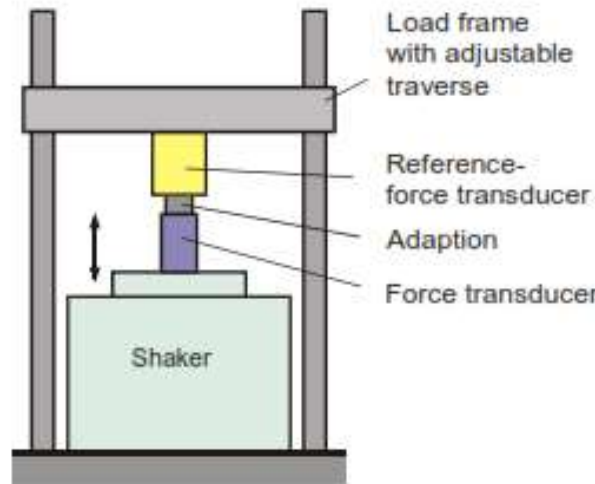
Şok biçimli kuvvetlerle dinamik kuvvet kalibrasyonu hakkında daha fazla bilgi için DKD R 3-10 Sheet 1'i inceleyebilirsiniz.

İkincil kalibrasyon

Birincil kalibrasyonun aksine, kalibrasyon sinyalleri dinamik ve izlenebilir şekilde kalibre edilmiş referans kuvvet transdüserleri kullanılarak yapılan ölçümlerle temsil edilir.

Sinüzoidal yük

Yüksek kuvvetler ve düşük frekanslara sahip bir sinüs kalibrasyonu durumunda, birincil kalibrasyon yöntemi çok uygun değildir. Çünkü bu durum orantısız olarak büyük ve ağır kütleleri gerektirebilir veya titreşim genlikleri kabul edilemez ölçüde büyüyebilecektir. Bu sebepten böyle gereksinimler için, kuvvetlerin bir gövde içinde elastik deformasyonlarla üretildiği bir yöntem kullanılması daha iyi olacaktır. Karşılaştırma prosedürüne göre çalışan böyle bir metodun kurulumu, Şekil 21'de gösterilmektedir. Kalibre edilecek kuvvet dönüştürücüsü, bir referans kuvvet dönüştürücü ve bir titreştirici (shaker), bir yük gövdesinde mekanik olarak seri şekilde bağlanırlar. Kurulum yüksekliği, dikey olarak ayarlanabilir bir hareketli tabla vasıtasıyla ilgili yükseklik için ayarlanabilir.

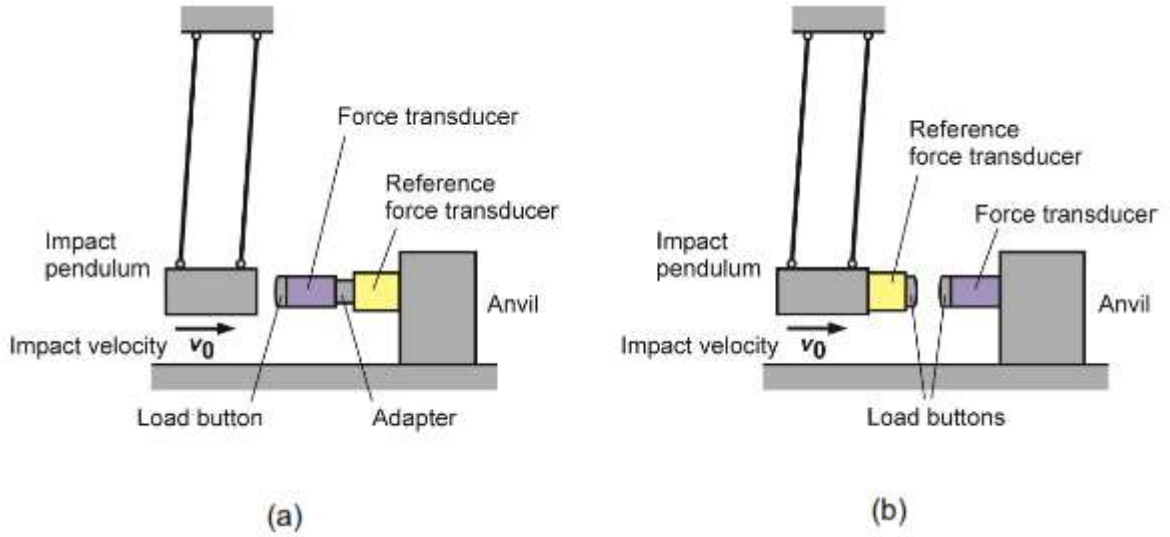


Şekil 4.28: Sinüzoidal kuvvetlerle ikincil kalibrasyonun temel prensibi

Şok yük

Örneğin, darbe sarkaç cihazlarında darbe kuvvetleri ile ikincil kalibrasyon yapılabilir (Şekil 22). Bu durumda, kalibre edilecek kuvvet dönüştürücüsü ve bir referans kuvvet dönüştürücüsü mekanik olarak sıra halinde monte edilir ve çarpışmaya sokulur. Örneğin, her iki dönüştürücü sabit örs üzerine monte edilebilir (Şekil 4.29a) veya test örneği ve referans kuvvet dönüştürücülerin her biri

örs ve darbe sarkaçına monte edilebilir (Şekil 4.29b). Dönüştürücülerin atalet kuvvetleri ve bağlantı parçaları (yükleme başlıkları, adaptörler) nedeniyle, genellikle farklı kuvvetler, her iki kuvvet dönüştürücüsüne etki eder. Kuvvet akışı içindeki bileşenlerin kütle ve sertlik dağılımına bağlı olarak meydana gelen ölçüm sapmaları, özellikle kısa kuvvet darbeleri durumunda, çok büyük hale gelebilir. Bu durumda karşılaştırma yöntemi artık kullanılabilir bir yöntem olmayacaktır.



Şekil 4.29. Bir darbe sarkaç kullanarak şok kuvvetleri ile ikincil kalibrasyonun temel prensibi, (a) her iki dönüştürücünün örs üzerine ortak sabitlenmesi, (b) darbe sarkaç ve örs için ayrı sabitleme

4.22. EN ISO 7500-1'e Göre Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu

Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu ISO 7500-1 standardına göre yapılmaktadır. Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kısaca aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir.

Öncelikle, kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin genel bir muayenesi gerçekleştirilir. Ardından, kalibrasyonda kuvvetin eksenel uygulanmasına imkân verecek ve çalışma güvenliğini bozmayacak bir şekilde, referans kuvvet ölçme cihazı, gerekli çekme veya basma aparatları kullanılarak tek eksenli statik malzeme test makinasına yerleştirilir. Kalibrasyon öncesi, referans kuvvet ölçme cihazının kararlı bir sıcaklığa ulaşabilmesi için yeterli bir sürenin geçmesi beklenir. EN ISO 376 standardına göre bu süre 30 dakikadan az olmamalıdır. Kalibrasyon 10 °C ile 35 °C arasında bir sıcaklıkta yapılır. Kuvvet ölçme cihazının sıcaklığı her kalibrasyon işlemi sırasında en fazla ± 2 °C aralığında değişim gösterebilir. Referans kuvvet ölçme cihazını tek eksenli statik malzeme test makinasına yerleştirdikten sonra kalibrasyonda istenen maksimum kuvvet değerine kadar ön yükleme amacıyla yüklenir.

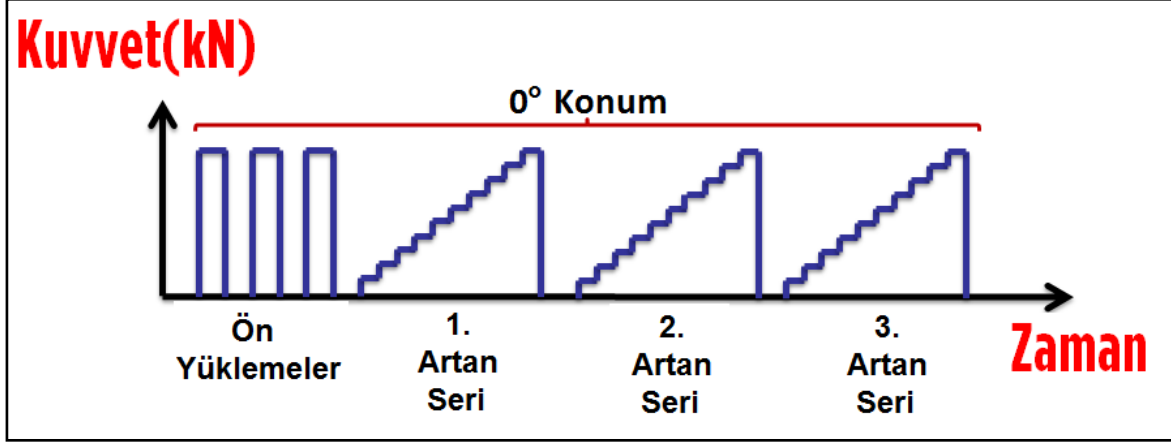
Daha sonra yük kaldırılır ve bu işlem üç defa daha tekrarlanır. Ön yükleme olarak adlandırılan bu işlem kapsamında, maksimum kuvvet değerine yükleme yapmadan önce ve sonra göstergedeki sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri her seferinde okunup kaydedilir. Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet doğrulama kalibrasyonu için uygulanacak kuvvet değerleri artan kuvvet adımları biçiminde 3 seri şeklinde gerçekleştirilir. Her bir serideki kuvvet basamakları, makinanın belirlenen maksimum kuvvet değerinin % 20 ile % 100 arasında en az beş eşit kuvvet adımına bölünmesi suretiyle belirlenir.

Genellikle kuvvet kalibrasyon laboratuvarları 10 eşit adım olacak şekilde kuvvet değerleri belirleyerek kalibrasyonlarını gerçekleştirirler. Kalibrasyon % 20 kapasitenin altındaki bölümde yapılacak ise, cihaz kapasitesinin % 10, % 7, % 4, % 2, % 1, % 0,7, % 0,4, % 0,2, % 0,1'indeki kuvvet adımlarında ölçümler yapılabilir. Her bir seri arasında referans kuvvet dönüştürücü 120° açı ile döndürülebilir. Her döndürmeden sonra 1 adet ön yükleme uygulanması da gereklidir.

Ancak referans kuvvet dönüştürücünün döndürülmesi zorunlu olmadığı için pek çok kalibrasyon laboratuvarı döndürmeksizin aynı konumda 3 seri ölçüm gerçekleştirir. Ayrıca, gerekli olduğu durumlarda veya müşteri tersinebilirlik ölçümü talep ediyorsa ilave bir artan azalan ölçüm serisi uygulanabilir. Tek eksenli statik malzeme test makinasının referans kuvvet ölçme cihazına her kuvvet adımında referans kuvvet dönüştürücüsüne bağlı gösterge elemanının kuvvet değeri (F) ve malzeme test makinasının göstergesinden okunan kuvvet değeri (Fi) aynı anda okunup kaydedilir.

Her bir ölçüm adımı için, göstergelerden takip edilen ölçüm değerleri, aynı sürelerde alınır. Her ölçüm serisi başlangıcında göstergelerden okunan sıfır değerleri kuvvet kaldırıldıktan en az 30 saniye sonrasında iki göstergeden de aynı anda kaydedilir.

Sıfır değerleri her seri bitiminde kaydedilir. Aşağıda, Şekil 4.30'da, EN ISO 7500-1 standardına göre çizilen tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunda uygulanan kuvvet ile zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.30. EN ISO 7500-1 standardına göre kuvvet-zaman grafiği

Malzeme Test Makinası Kuvvet Kalibrasyonu Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

EN ISO 7500-1 standardına göre alınan veriler aşağıdaki hata değerleri hesaplanarak değerlendirilir.

Bağıl Doğruluk Hatası, q

Bağıl doğruluk hatası (q) aşağıdaki formüllerde de verildiği gibi her bir seri için okunan kuvvetin (F_i) gerçek kuvvetten (F) farkının yüzde cinsinden değeri ile hesaplanır, daha sonra her bir seri için hesaplanan bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ölçümün bağıl doğruluk hatası elde edilmiş olur.

$$q_1 = \frac{F_{1i} - F_1}{F_1} \cdot 100 \quad (23)$$

$$q_2 = \frac{F_{2i} - F_2}{F_2} \cdot 100 \quad (24)$$

$$q_3 = \frac{F_{3i} - F_3}{F_3} \cdot 100 \quad (25)$$

$$q = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3} \quad (26)$$

Burada,

q : bağıl doğruluk hatası

$F_{1,2,3}$: her bir seri için okunan kuvvet değeri, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

$F_{1,2,3}$: her bir seri için gerçek kuvvet değeri, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

Bağıl Tekrarlanabilirlik Hatası, b

Bağıl tekrarlanabilirlik hatası, bağıl doğruluk hatası kapsamında her bir seri için hesaplanan bağıl doğruluk değerinin (q_1, q_2, q_3) en büyüğü ile en küçüğü arasındaki farktır.

$$b = q_{max} - q_{min} \quad (26)$$

Burada,

b : bağıl tekrarlanabilirlik hatası

q_{max} : Maksimum doğruluk hatası, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

q_{min} : Minimum doğruluk hatası, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

Bağıl Tersinebilirlik Hatası, v

Bu hata, sadece talep edildiği takdirde hesaplanarak sertifikaya ilave edilir. Bağıl tersinebilirlik hatası, doğruluk kontrolünün aynı basamak kuvvetlerde önce artan, sonra azalan kuvvetlerle gerçekleştirilmesiyle hesaplanır. Bu nedenle, makina azalan test kuvvetleriyle de kalibre edilmelidir. Artan ve azalan test kuvvetlerinde elde edilen değerler arasındaki fark, aşağıdaki formül kullanılarak, yüzde cinsinden hesaplanan bağıl tersinebilirlik hatasını verir.

$$v = \frac{F - F'}{\bar{F}} \cdot 100 \quad (27)$$

Burada,

v : bağıl tersinebilirlik hatası,

F : Artan yönlü kalibrasyon gerçek kuvvetini,

F' : Azalan yönlü kalibrasyon gerçek kuvvetini,

$\bar{F}$: Artan yönlü kalibrasyon gerçek kuvvetlerinin aritmetik ortalama değerini ifade eder.

Bağıl Sıfır Hatası, f_0

Kalibrasyondaki her bir seri öncesi malzeme test makinasının gösterge değeri sıfırlanır. Seri tamamlandıktan 30 s sonra malzeme test makinasının göstergesindeki sıfır değeri okunur. Aşağıdaki eşitlik kullanılarak bağıl sıfır hatası yüzde cinsinden hesaplanır.

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \cdot 100 \quad (28)$$

Burada,

f_0 : Bağıl sıfır hatası,

F_N : Malzeme test makinasının uygulanan serideki maksimum kuvvet değeri,

F_{i0} : Malzeme test makinasının kuvvet kaldırıldıktan sonraki gösterge değerini ifade eder.

Bağıl Çözünürlük Hatası, a

Kuvvet gösterge elemanın bağıl çözünürlüğü “a”, yüzde olarak aşağıdaki formül ile tanımlanır. Bağıl çözünürlük hatası “a”, her kalibrasyon noktasında kontrol edilmelidir

$$a = \frac{r}{F_i} \cdot 100 \quad (28)$$

Burada,

a : Bağıl çözünürlük hatası,

r : Malzeme test makinasının çözünürlük değeri,

F_i : Malzeme test makinasının uygulanan noktadaki kuvvet değerini ifade eder.

Malzeme Test Makinası Kuvvet Sistemin Sınıflandırılması

Aşağıdaki tabloda tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet ölçme sistemlerinin sınıflandırılması için müsaade edilen maksimum değerler verilmiştir.

Tablo 4.23. Tek eksenli statik malzeme test makinalarının sınıflandırılması

Makinanın Sınıfı	Müsaade Edilen En Yüksek Değer				
	Bağıl Hatalar (%)				
	Doğruluk (q)	Tekrarlanabilirlik (b)	Tersinebilirlik * (v)	Sıfır (f ₀)	Çözünürlük a
0,5	± 0,5	0,5	± 0,75	± 0,05	0,25
1	± 1,0	1,0	± 1,5	± 0,1	0,5
2	± 2,0	2,0	± 3,0	± 0,2	1,0
3	± 3,0	3,0	± 4,5	± 0,3	1,5

Bu sınıflandırma, kalibrasyonda uygulanan maksimum kuvvetin en az % 20'si ile % 100'ü arasındaki ölçüm aralığını kapsamalıdır.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının sınıflandırılmasında ölçüm sonucu bulunan belirsizlik değerinin sınıfa bir etkisi yoktur.

Kalibrasyon Sertifikası

Kalibrasyon sertifikası EN ISO 7500-1 standardına göre en az aşağıdaki bilgileri içermelidir:

- Bu standarda atıf (ISO 7500-1),
- Test makinasının tanıtılması (tip, üretici, üretim yılı, seri no), mümkün ise göstergenin tanımlanması (tipi, seri numarası, çözünürlüğü, çalışma prensibi vs.),
- Makinanın bulunduğu yer (adres),
- Kullanılan kuvvet ölçme cihazının tipi ve seri no ile kalibrasyon sertifika no ve sertifikanın geçerliliğinin sona erdiği tarih,

- e) Kalibrasyonun yapıldığı ortam sıcaklığı,
- f) Kalibrasyonun yapıldığı tarih,
- g) Kalibrasyonu gerçekleştiren kurumun adı veya işareti,

Kontrol Sonuçları:

- h) Genel muayene sırasında belirlenen her türlü anormallik,
- i) Kullanılan her bir kuvvet ölçme sistemi için, kalibre edilen her bir aralığın sınıfı, talep edildiği takdirde bağıl doğruluk, tekrarlanabilirlik, sıfır ve çözünürlük hatalarının basamak değerleri,
- j) Değerlendirmenin geçerli olduğu her bir aralığın alt sınırı,

İki kalibrasyon arasındaki süre, test makinasının tipine, bakım standardına, kullanım sıklığına ve test edilen malzeme tipine bağlıdır. Aksi belirtilmediği takdirde, kalibrasyon 12 ayı geçmeyen sürelerle tekrarlanır. Doğruluğun kontrolü, makina bir yerden bir yere taşınmışsa veya büyük bir bakım veya onarım görmüş ise derhal tekrarlanır.

4.23. EN ISO 7500-1'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, EN ISO 7500-1 standardının Ek C kısmında ve EURAMET CG-04 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır. Aşağıda verilen bilgiler bu dokümanlar referans alınarak oluşturulmuştur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu EN ISO 7500-1 standardına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, çözünürlük, referans standart, sıcaklık, kayma, enterpolasyon denklemine doğrusal yaklaşım) bileşenler hesaplanır. Aşağıda bu büyüklükler ve bunlara ait tahmini istatistiksel dağılım fonksiyonları verilmiştir. Bu dağılım fonksiyonlarının seçimi deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Buna göre, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu ölçümünde bileşik belirsizlik aşağıdaki (29) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} \quad (29)$$

Genişletilmiş bağıl belirsizlik ise;

$$U = k \cdot u_c = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} \quad (30)$$

Eşitliklerdeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

u_i : bağıl ölçüm belirsizliği bileşenini,

u_c : cihazın toplam bağıl ölçüm belirsizliğini,

k : kapsam faktörü,

U : toplam genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğini ifade eder.

Bu parametrelerin hesabına aşağıda detaylı olarak yer verilmiştir.

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Kuvvet Ölçme Cihazından Kaynaklanan Bağıl Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{std}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının oluşturduğu bağıl belirsizlik bileşenleri (u_{std}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2 + u_{approx}^2} \quad (31)$$

Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{cal}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağıl belirsizlik bileşeni (u_{cal}), cihazın kalibrasyon sertifikasında beyan edilen en büyük ölçüm belirsizliği değerinin yarısı olarak alınır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{cal} = \frac{W_{ref}}{2} \quad (k = 1) \quad (32)$$

W_{ref} : Referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeridir.

Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının uzun süreli kayma değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{drift}

Referans kuvvet ölçme cihazının gösterge değerinin uzun süreli kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{drift}), hesabı için cihazın son kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge ortalama değeri (X_{r-son}) ile referans kuvvet ölçme cihazının bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge ortalama değeri ($X_{r-önceki}$) arasındaki bağıl farka dikdörtgen dağılım uygulanır.

Bu belirsizlik bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{drift} = 100 \cdot \left| \frac{X_{r-son} - X_{r-önceki}}{X_{r-son}} \right| \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} \quad (33)$$

Burada,

X_{r-son} : Referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen dönümlü gösterge ortalama değeri

$X_{r-önceki}$: Referans kuvvet ölçme cihazının önceki kalibrasyon sertifikasında belirtilen dönümlü gösterge ortalama değerini ifade eder.

Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{temp}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı (T_{kal}) ile bu kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının kendi kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri (T_{sert}) arasındaki fark nedeniyle meydana gelen sıcaklık bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{temp}) hesabı aşağıdaki eşitlik yardımıyla gerçekleştirilir.

$$u_{temp} = |\alpha \cdot (T_{kal} - T_{sert})| \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (34)$$

Burada,

T_{sert} : Referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri ($^{\circ}\text{C}$),

T_{kal} : Kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığıdır. ($^{\circ}\text{C}$)

α : Referans kuvvet dönüştürücünün üreticisi tarafından verilen ısı genleşme katsayısını ($\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) ifade eder.

Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının enterpolasyon denklemine doğrusal yaklaşım bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{approx}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının sertifikasında belirtilen 3. derece polinom eşitliğine doğrusal yaklaşım nedeniyle meydana gelen bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{approx}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{approx} = 100 \cdot \left| \frac{X_r - X_a}{X_a} \right| \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (35)$$

Burada,

X_r : Referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması

X_a : Referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan hesapla (en küçük kareler yöntemi) belirlenmiş gösterge değerleri

Kalibrasyon Sonuçlarının Tekrarlanabilirliği Bağlı Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{rep}

Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirliği bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{rep}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i - q)^2} \quad (36)$$

Burada,

n : Kalibrasyondaki ölçüm serisi sayısıdır.

q_i : Kalibrasyondaki her bir ölçüm serisinin bağlı doğruluk hatasıdır

q : Kalibrasyonda yer alan ölçüm serilerinin ortalama bağlı doğruluk hatasıdır.

Kalibrasyonu Yapılan Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinasının Kuvvet Gösterge Ekranının Çözünürlüğü Bağlı Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{res}

Bazı malzeme test makinalarının kuvvet gösterge ekranı iki veya daha fazla çözünürlük değerine sahiptir. Öyle ki, düşük kuvvet kapasitelerinde, malzeme test makinası yüksek çözünürlük değeriyle çalışırken, yüksek kuvvet kapasitelerinde ise makina gösterge ekranı daha düşük bir çözünürlük değeriyle çalışmaktadır.

EN ISO 7500-1 standardı çözünürlük parametresi için bağlı ölçüm belirsizliğini tanımlarken bu durumu göz önünde bulundurmuştur. Kalibrasyonu yapılan malzeme test makinasının kuvvet gösterge ekranının çözünürlüğü bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{res} = \sqrt{\left(\frac{a_F}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_Z}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (37)$$

Burada,

a_F : Malzeme test makinası kuvvet göstergesinin uygulanan her bir yükteki bağlı çözünürlük hatası,

a_Z : Malzeme test makinası kuvvet göstergesinin sıfır yük değerindeki bağlı çözünürlük hatasını ifade eder.

Bileşik Bağlı Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, u_c :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm bağlı ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{u_{std}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \quad (38)$$

Genişletilmiş Bağlı Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, U :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliğinin hesabı, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için ($k=2,0$) değerinde alınması ve kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi çerçevesinde, hesaplanan bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı olarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$U = k \cdot u_c$$

Tahmini Ortalama Bağlı Hata Değerinin Hesabı, E :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonucu hesaplanan tahmini ortalama bağlı hata (E) değeri ve ortalama üretilmiş kuvvet (F) değeri, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$E = q \mp U \quad (39)$$

$$F = F_i - \frac{F_i}{100} (q \mp U) \quad (40)$$

Burada,

F_i : her bir seri için okunan kuvvet değeri

q : Kalibrasyonda yer alan ölçüm serilerinin ortalama bağlı doğruluk hatası

U : Kalibrasyon ölçüm verilerinin değerlendirilmesi sonucu hesaplanan genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliğidir.

Azalan Kuvvetler Alındığında Tahmini Ortalama Bağlı Hata Değerinin Hesabı, E' :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda müşterinin isteği doğrultusunda ya da azalan yönde kuvvet okuması yapıldığı durumlarda bir seride (genellikle 3 seri

sonunda) azalan yönde de kuvvet değerleri alınır. Azalan kuvvetler için, birleşik belirsizlik, u_c' , bağıl doğruluk (q) ve bağıl tersinebilirlik (v) hatası değerlerinin katkılarından hesaplanabilir. Bağıl tersinebilirlik (v) hatası değerinin belirsizlik katkısının, artan yöndeki doğruluk hatası q ile aynı olduğu varsayılır. EN ISO 7500-1 standardının Ek C.2.6 başlığı altında verildiği şekilde, birleşik belirsizlik u_c' eşitlik ile de gösterildiği gibi tahmin edilmiştir:

$$u_c' = \sqrt{2} \cdot u_c \quad (41)$$

$$U' = k \cdot u_c' \quad (42)$$

Azalan yönde kuvvet değerleri alındığında hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E') değeri ve ortalama üretilmiş azalan kuvvet (F') değeri, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$E' = (q + v) \pm U' \quad (43)$$

$$F' = F_i' - \frac{F_i'}{100} ((q + v) \pm U') \quad (44)$$

Burada,

q : Kalibrasyonda yer alan ölçüm serilerinin ortalama bağıl doğruluk hatasıdır.

v : Kalibrasyonda yer alan azalan ölçüm serisinin bağıl tersinebilirlik hatasıdır

U' : Kalibrasyon ölçüm verilerinin değerlendirilmesi sonucu azalan kuvvet değerleri dikkate alınarak hesaplanan genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğidir.

Kalibrasyon Sonucu Hesaplanan Bağıl Ölçüm Belirsizliğinin Raporlanması

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 7500-1 standardına göre gerçekleştirilen kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, bu bölümde yer alan (1) ile (12) arasındaki formüller kullanılarak belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır.

Ölçüm aralığı, aksi belirtilmediği sürece genel olarak tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının maksimum kuvvet kapasitesi (F_N) değerinin % 20'si ile % 100'ü arasındaki bölgeyi kapsar. Ölçüm aralığı belirlendikten sonra bu bölgedeki en büyük belirsizlik değeri cihazın bağıl ölçüm belirsizliği olarak beyan edilir.

4.24. EN ISO 7500-1'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin, EN ISO 7500-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu sonucunda elde edilen ölçüm verileri Tablo 4.24'de verilmiştir.

Tablo 4.24. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Kuvvet Değerleri kN	1. Seri (Artan)		2. Seri (Artan)		3. Seri (Artan)	
	F_1 kN	X_1 mV/V	F_2 kN	X_2 mV/V	F_3 kN	X_3 mV/V
0,0	0,000	0,00000	0,000	0,00000	0,000	0,00000
1,0	1,000	0,10532	1,000	0,10538	1,002	0,10563
2,0	2,004	0,21112	2,000	0,21085	2,000	0,21083
3,0	3,000	0,31613	3,001	0,31635	3,003	0,31647
4,0	4,001	0,42152	4,001	0,42163	4,001	0,42170
5,0	4,999	0,52668	5,000	0,52700	5,002	0,52721
6,0	6,000	0,63221	6,004	0,63272	6,049	0,63750
7,0	7,001	0,73774	7,001	0,73779	7,001	0,73776
8,0	8,001	0,84302	8,001	0,84323	8,000	0,84314
9,0	9,001	0,94847	9,001	0,94846	9,001	0,94860
10,0	10,001	1,05383	10,001	1,05402	10,000	1,05375
0,0	0,000	-0,00031	0,003	0,00023	0,001	0,00000

Tabloda yer alan 3 kN kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir. Bu kapsamda öncelikle, Tablo 4.25'de verilen enterpolasyon denklemi ve (a,b,c) enterpolasyon katsayıları kullanılarak referans kuvvet ölçme cihazından okunan gösterge değerleri (mV/V) biriminden (kN) birimine dönüştürülür.

Tablo 4.25. Referans kuvvet ölçme cihazının gösterge değerlerinin dönüştürülmesi için enterpolasyon denklemi ve enterpolasyon katsayıları

$F(kN)=a \cdot X(mV/V)+b \cdot X^2(mV/V)^2+c \cdot X^3(mV/V)^3$ 3. derece polinom eşitlik		
<i>a- enterpolasyon katsayısı</i>	9,47673891	kN/(mV/V)
<i>b- enterpolasyon katsayısı</i>	0,00418950	kN/(mV/V) ²
<i>c- enterpolasyon katsayısı</i>	-0,00438964	kN/(mV/V) ³

Referans kuvvet ölçme cihazından okunan her bir gösterge değerinin (X_1, X_2, X_3) (mV/V) biriminden (kN) birimine dönüşümü için, referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan enterpolasyon denklemi ve (a,b,c) enterpolasyon katsayıları kullanılır. Bu işlem aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_1 = a \cdot X_1 + b \cdot X_1^2 + c \cdot X_1^3$$

$$F_1 = 9,47673891 \cdot 0,31613 + 0,00418950 \cdot 0,31613^2 + (-0,00438964) \cdot 0,31613^3$$

$$F_1 = 2,996 \text{ kN}$$

$$F_2 = a \cdot X_2 + b \cdot X_2^2 + c \cdot X_2^3$$

$$F_1 = 9,47673891 \cdot 0,31635 + 0,00418950 \cdot 0,31635^2 + (-0,00438964) \cdot 0,31635^3$$

$$F_2 = 2,998 \text{ kN}$$

$$F_3 = a \cdot X_3 + b \cdot X_3^2 + c \cdot X_3^3$$

$$F_1 = 9,47673891 \cdot 0,31647 + 0,00418950 \cdot 0,31647^2 + (-0,00438964) \cdot 0,31647^3$$

$$F_3 = 2,999 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Yukarıdaki hesap yöntemi esas alınarak Tablo 4.24'da yer alan tüm kuvvet değerleri için referans kuvvet ölçme cihazından okunan her bir gösterge değeri (kN) birimine dönüştürülür. Aşağıda Tablo 4.26'da her bir nominal kuvvet değeri için, kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazından okunan kuvvet değerleri ve birim dönüşümü yapılmış referans kuvvet ölçme cihazının gösterdiği değerler yer almaktadır.

Tablo 4.26. Her bir nominal kuvvet değeri için, kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazından okunan kuvvet değerleri ve birim dönüşümü yapılmış referans kuvvet ölçme cihazının gösterdiği kuvvet değerleri

Kuvvet Değerleri kN	1. Seri (Artan)		2. Seri (Artan)		3. Seri (Artan)	
	F_{1i} kN	F_1 kN	F_{2i} kN	F_2 kN	F_{3i} kN	F_3 kN
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	1,000	0,998	1,000	0,999	1,002	1,001
2,0	2,004	2,001	2,000	1,998	2,000	1,998
3,0	3,000	2,996	3,001	2,998	3,003	2,999
4,0	4,001	3,995	4,001	3,996	4,001	3,997
5,0	4,999	4,992	5,000	4,995	5,002	4,997
6,0	6,000	5,992	6,004	5,997	6,049	6,042
7,0	7,001	6,992	7,001	6,992	7,001	6,992
8,0	8,001	7,989	8,001	7,991	8,000	7,991
9,0	9,001	8,988	9,001	8,988	9,001	8,990
10,0	10,001	9,986	10,001	9,988	10,000	9,986
0,0	0,000	-0,003	0,003	0,002	0,001	0,000

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{cal}), cihazın kalibrasyon sertifikasında beyan edilen en büyük belirsizlik değerinin yarısıdır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{cal} = \frac{W_{ref}}{2} = \frac{0,045}{2}$$

$u_{cal} = \% 0,023$ olarak bulunur.

Referans kuvvet ölçme cihazının gösterge değerinin kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{drift}) hesabı için, cihazın son kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması (X_{r-son}) ile referans kuvvet ölçme cihazının bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması ($X_{r-önceki}$) arasındaki farka dikdörtgen dağılım uygulanır.

Bu örnekte, referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması $X_{r-son} = 1,05591$ mV/V ve aynı cihazın bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması $X_{r-önceki} = 1,05545$ mV/V olarak alınırsa, referans kuvvet ölçme cihazının dönümlü gösterge değerinin kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{drift}) hesabı şu şekilde gerçekleştirilir.

$$u_{drift} = 100 \cdot \left| \frac{X_{r-son} - X_{r-önceki}}{X_{r-son}} \right| \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} = 100 \cdot \left| \frac{1,05591 - 1,05545}{1,05591} \right| \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}}$$

u_{drift} = % 0,013 olarak bulunur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ile bu kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının kendi kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri arasındaki fark nedeniyle meydana gelen sıcaklık bağılı belirsizlik bileşeninin (u_{temp}) hesabı aşağıdaki gibidir.

Bu örnekte, referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri $T_{sert} = 21^{\circ}\text{C}$, kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ise $T_{kal} = 25^{\circ}\text{C}$, referans kuvvet dönüştürücü malzemesinin ısı genleşme katsayısı $\alpha = \% 0,00150 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ olarak alınmıştır.

$$u_{temp} = |\alpha \cdot (T_{kal} - T_{sert})| \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = |0,00150 \cdot (25 - 21)| \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

u_{temp} = % 0,003 olarak bulunur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının sertifikasında belirtilen 3. derece polinom eşitliğine doğrusal yaklaşım nedeniyle oluşan bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{approx}) hesabı ise aşağıdaki gibidir.

Bu örnekte, referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması $X_r = 0,21100 \text{ mV/V}$, referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan hesaplama (en küçük kareler yöntemi) belirlenmiş gösterge değeri $X_a = 0,21103 \text{ mV/V}$ olarak alınmıştır. X_r ve X_a değerleri arasındaki en büyük bağıl fark, 1 kN ile 10 kN arasındaki kuvvet ölçüm aralığında seçilmiştir.

$$u_{approx} = 100 \cdot \left| \frac{X_r - X_a}{X_a} \right| \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 100 \cdot \left| \frac{0,21100 - 0,21103}{0,21103} \right| \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

u_{approx} = % 0,008 olarak bulunur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının oluşturduğu bağıl belirsizlik bileşenleri (u_{std}) aşağıda gibi hesaplanır.

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2 + u_{approx}^2} = \sqrt{0,023^2 + 0,013^2 + 0,003^2 + 0,008^2}$$

u_{std} = % 0,027 olarak bulunur.

3 kN kuvvet basamağındaki her bir artan ölçüm serisi için, bağıl doğruluk hatası (q_1, q_2, q_3) değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$q_1 = \frac{F_{1i} - F_1}{F_1} \cdot 100 = \frac{3,000 - 2,996}{2,996} \cdot 100 = \% 0,141$$

$$q_2 = \frac{F_{2i} - F_2}{F_2} \cdot 100 = \frac{3,001 - 2,998}{2,998} \cdot 100 = \% 0,092$$

$$q_3 = \frac{F_{3i} - F_3}{F_3} \cdot 100 = \frac{3,003 - 2,999}{2,999} \cdot 100 = \% 0,121$$

Her bir artan ölçüm serisi için, hesaplanan bağıl doğruluk hatası değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ölçümün bağıl doğruluk hatası (q) aşağıda gösterildiği gibi belirlenir.

$$q = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3} = \frac{0,141 + 0,092 + 0,121}{3} = \% 0,118$$

3 kN kuvvet basamağındaki 3 artan ölçüm serisi için, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{rep}) hesabı aşağıdaki gibidir.

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i - q)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3 \cdot (3 - 1)} \cdot [(0,141 - 0,118)^2 + (0,092 - 0,118)^2 + (0,121 - 0,118)^2]}$$

$u_{rep} = \% 0,014$ olarak bulunur.

n : Kalibrasyondaki seri sayısıdır, bu örnekte 3 artan ölçüm serisi vardır.

q_i : 3 kN kuvvet basamağında her bir serinin bağıl doğruluk hatasıdır.

q : 3 kN kuvvet basamağında yer alan üç artan serinin ortalama bağıl doğruluk hatasıdır.

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşenini (u_{res}) hesaplamak için öncelikle tek eksenli statik malzeme test makinasının bağıl çözünürlük hatasının belirlenmesi gerekir. Bu örnekte, malzeme test makinasının çözünürlüğü (r), tüm kuvvet değerleri için 0,001 kN alınmıştır.

Bu nedenle 3 kN'luk kuvvet değeri için, malzeme test makinasının kuvvet gösterge ekranının uygulanan her bir yükteki bağıl çözünürlük hatası (a_F) ve sıfır yük değerindeki bağıl çözünürlük hatası (a_Z), aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$a_F = \frac{r}{F_i} \cdot 100 = \frac{0,001}{3,001} \cdot 100 = \% 0,033$$

$$a_Z = \frac{r}{F_i} \cdot 100 = \frac{0,001}{3,001} \cdot 100 = \% 0,033$$

3 kN kuvvet değerinde tek eksenli statik malzeme test makinasının çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{res}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{res} = \sqrt{\left(\frac{a_F}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_Z}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,033}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,033}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

$u_{res} = \% 0,013$ olarak bulunur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağıl ölçüm belirsizliği değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{u_{std}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} = \sqrt{0,014^2 + 0,013^2 + 0,027^2}$$

$u_c = \% 0,034$ olarak bulunur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için ($k=2,0$) değerinde alınması ve bu örnekte hesaplanan bileşik bağıl ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı sonucu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,034$$

$U = \% 0,067$ olarak hesaplanır.

3 kN nominal kuvvet değeri için, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonucu hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E) değeri, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E = q \pm U = \% (0,118 \pm 0,067)$$

$$F = F_i - \frac{F_i}{100}(q \mp U) = F_i - \frac{F_i}{100}(0,118 \mp 0,067)$$

şeklinde ifade edilir.

3 kN nominal kuvvet değeri için, azalan kuvvet değeri alınmış olsa ve tersinebilirlik hatası değeri $v = \% 1,39$ olarak hesaplandığını kabul edersek, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonucu azalan kuvvetler alındığında hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E') değeri, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u'_c = \sqrt{2} \cdot u_c = \sqrt{2} \cdot 0,034 = \% 0,048$$

$$U' = k \cdot u'_c = 2 \cdot 0,048 = \% 0,096$$

$$E' = q + v \pm U' = \% (0,118 + 1,39 \pm 0,096) = \% (1,58 \pm 0,096)$$

$$F' = F'_i - \frac{F'_i}{100}((q + v) \pm U') = F'_i - \frac{F'_i}{100}((0,118 + 1,39) \pm 0,096) = F'_i - \frac{F'_i}{100}(1,58 \pm 0,096)$$

şeklinde ifade edilir.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının, EN ISO 7500-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen örnek kalibrasyon hesabı neticesinde bağıl belirsizlik bileşenleri, tahmini değer, olasılık dağılımı, duyarlılık katsayısı ve belirsizlik katkısı parametrelerinden oluşan bilgiler aşağıda Tablo 4.27'da özetlenmiştir.

Tablo 4.27. Referans kuvvet ölçme cihazı ile kalibre edilen tek eksenli statik malzeme test makinası kuvvet ölçme cihazı örnek hesabı sonucundaki belirsizlik bileşenleri ve katkıları

Girdi Büyüklüğü			Belirsizlik Bileşeni				Duyarlılık Katsayısı C_i	Belirsizliğe Katkısı $u_i(x_i)$
Sembol	Tanım	Tahmini Değeri x_i	Değeri	Olasılık Dağılımı	Çarpan	Standart Belirsizlik $u(x_i)$		
u_{cal}	Referans kuvvet ölçme cihazının bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	0,118 %	0,0450 %	Normal dağılım	0,5	0,0225 %	1	0,0225 %
u_{drift}	Referans kuvvet ölçme cihazının kayma (drift) değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0225 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0130 %	1	0,0130 %
u_{temp}	Referans kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0060 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0035 %	1	0,0035 %
u_{approx}	Referans kuvvet ölçme cihazının enterpolasyon yaklaşımı bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0142 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0082 %	1	0,0082 %
u_{rep}	Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0140 %	Standart sapma	1	0,0140 %	1	0,0140 %
u_{res}	Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0233 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0135 %	1	0,0135 %
q		0,118 %					Bileşik Belirsizlik	u_c 0,0336 %
							Genişletilmiş Belirsizlik	U 0,0673 %

Kalibrasyon sertifikasında diğer kuvvet basamakları için belirsizlik değeri benzer şekilde hesaplanmalı ve elde edilen en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20'si ile % 100'ü arasında belirlenirse bu cihaz için 2 kN ile 10 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir. Örneğin, 2 kN - 10 kN ölçüm aralığı için en büyük bağıl doğruluk ve en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri 3 kN kuvvet adımıyla elde edildiği kabul edilirse, kalibrasyon sonucu tahmini ortalama bağıl hata beyanı aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$E = \% (0,118 \pm 0,067)$$

Eğer azalan yönde kuvvet değerleri alınırsa, hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E') değeri beyanı ise aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$E' = \% (0,118 + 1,39 \pm 0,096)$$

4.25.ASTM E4'e Göre Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu

ASTM E4 standardı hem statik hem de yarı statik malzeme test makinalarının kuvvet doğrulaması için prosedürleri açıklar. Bir malzeme test makinası; bir gövde, kuvvet ölçme cihazı, kuvvet göstergesi veya okuma sistemi, çeneler veya bağlantı aparatları ve düzenli test prosedürleri için kullanılan bileşenlerden oluşur. Malzeme test makinalarının kuvvet ölçüm sistemi izin verilen değişimler içinde olduğunda doğru kuvvet sonuçları sağlar ve bu sistemler, referans ağırlıklar veya referans elastik gövdeli kuvvet ölçme cihazları kullanılarak doğrulanabilir.

ASTM E4 standardına göre doğrulanan (kalibre edilen) malzeme test makinası kuvvet gösterge sistemleri $\pm \% 1$ doğrulukta olması gereklidir. Ayrıca, ölçüm alınması sonrasında seriler arasındaki tekrarlanabilirlik hatasının, ASTM E 4 standardına uygun olabilmesi için $\pm \% 1$ 'den daha az veya buna eşit olması gereklidir.

Bu doğrulamada kullanılacak referans cihazların uygun izlenebilirliğe sahip olması gereklidir. ASTM E4 standardına göre yapılacak kalibrasyon işleminde, referans kuvvet ölçme cihazının ASTM E 74 standardına göre kalibre edilmiş olması gerekliliği ve sınıf A veya daha iyi sınıflı bir cihazın kullanılması tanımlanmıştır.

ASTM E4 standardına göre 3 farklı yöntem ile kuvvet kalibrasyonu veya doğrulaması yapılabilir. Bunlar:

- **Metod A, Standart ağırlıklarla doğrulama:** Standart ağırlıkların, mümkün olan durumlarda test makinasının kuvvet mekanizmasına doğrudan uygulanması ile yapılan en doğru yöntemdir. Standart ağırlıklar aşağı doğru bir kuvvetle çalıştırılmak üzere tasarlandığında yöntemin sınırlamaları şunlardır: (1) küçük kuvvet değerlerinde doğrulama yapılabilmesi, (2) büyük miktarda standart ağırlıkların taşınmasının gerekliliği ve (3) yatay test makinaları veya dikey test makinalarında kuvvet sistemleri sebebiyle kullanılamamalarıdır.
- **Metod B, Eş kollu terazi ve standart ağırlıklarla doğrulama:** İkinci doğrulama yöntemi, kuvvetin eş kollu terazi ve standart ağırlıklar kullanılarak ölçülmesini içerir. Bu yöntem, yukarıdaki yöntemle göre daha küçük bir kuvvet aralığı ile sınırlıdır. Genellikle kuvvetin bir iç kaldıraç sistemi yoluyla uygulandığı belirli sertlik test makinası tiplerinde uygulanabilir.
- **Metod C, Kuvvet ölçüm cihazı ile doğrulama:** Üçüncü doğrulama yöntemi, bir kuvvet ölçme cihazı, ölçme halkası, çekme veya basma çubuğu veya başka prensipli bir kuvvet ölçme cihazının kuvvet altında elastik şekil değişimi ile test makinasının sapmasının ölçülmesini içerir. Yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

ASTM E4 kuvvet doğrulaması, seçilen kuvvet aralıklarında yer alan kuvvetlerin en az iki seri olarak uygulanmasını tanımlar. Ayrıca, test makinasının kuvvet gösterge sisteminde ayarlama yapılırsa, ayarlama sonrası alınan iki seri ölçümler yeni doğrulama raporunda verilmesi gerektiğini ifade eder.

Doğrulama Kuvvetlerinin Seçimi

Doğrulanacak test makinasının onaylanmış kuvvet aralığının alt ve üst sınırları belirlenir. Onaylanmış kuvvet aralığı, test makinası kuvvet göstergesinin çözünürlüğünün 200 katının altındaki kuvvetleri içermemelidir.

Doğrulanmış kuvvet aralığının alt sınırı üst sınırın onda birine eşit olabilir. Eğer onda birinden büyük ise beş veya daha fazla doğrulama kuvvet adımı seçilmelidir. İki doğrulama kuvvet adımı arasındaki fark, doğrulanmış kuvvet aralığının üst ve alt limitleri arasındaki farkın yirmide birinden daha büyük veya buna eşit olabilir. Ya da üçte birinden daha az veya buna eşit olacak şekilde olabilir. Eğer iki farklı kuvvet aralığında doğrulama yapılacaksa, bir doğrulanmış kuvvet aralığının alt limiti diğer doğrulanmış başka bir kuvvet aralığının üst limiti olmalıdır.

Doğrulama kuvveti aralığının alt sınırı, üst sınırın onda biri kadar ise, doğrulama kuvvetleri aşağıdaki gibi seçilmelidir:

- Doğrulanmış kuvvet aralığının alt sınırından başlayarak, her biri maksimum kuvvetin onda biri olacak şekilde on eşit adım oluşturulur. Ancak en yüksek kuvvet basamağı tam olarak onda biri de olmayabilir.
- Beş veya daha fazla farklı doğrulama kuvveti adımları da seçilebilir. Kuvvet adımları için kuvvet oranının 1:1, 2:1, 4:1, 7:1, 10:1 veya 1:1, 2,5:1, 5:1, 7,5:1, 10:1 olması önerilir
- Eğer en yüksek onda biri tam olarak onda bire eşit değilse, olası oranlarda doğrulama kuvvetleri seçilir ve doğrulanan kuvvet aralığının üst sınırına eklenir. İki bitişik doğrulama kuvveti arasındaki fark, üst limitin üçte birinden büyükse, ilave bir doğrulama kuvveti eklenmelidir. Daha iyi anlaşılması için aşağıdaki örnek incelenmelidir.
- **Örnek:** Test makinasının maksimum kapasitesi 5000 N ve cihazın çözünürlüğü ise 0,0472 N olsun. Bu durumda en küçük veya alt sınır doğrulama kuvveti 9,44 N ($0,0472 \times 200 = 9,44$ N) olacaktır. Bu durumda doğrulama kuvvet aralığı 9,44 N, 94,4 N ve 944 N olabilir ama bunun yerine 10 N, 100 N ve 1000 N seçilir. Uygun doğrulama kuvvetleri olarak 10, 20, 40, 70, 100, 200, 400, 700, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 olarak belirlenebilir. 2000 ve 4000 arasındaki fark 5000'in üçte birinden fazla olduğu için 3000 N adımı eklenmiştir. Alternatif kuvvet dağılımı kullanılırsa, seçilen doğrulama kuvvetleri 10, 25, 50, 75, 100, 250, 500 750, 1000, 2500, 3750, 5000 olabilir.

Seçilen tüm doğrulama kuvvetleri, doğrulama prosedürü sırasında iki seri uygulanacaktır. İkinci seride uygulanan kuvvetler, ilk seridekiler ile yaklaşık olarak aynı olacaktır.

Bir seride maksimum kuvvet kaldırıldıktan yaklaşık 30 s sonra, sıfıra dönüş değeri kaydedilmelidir. Bu değer, çözünürlük, ya uygulanan maksimum kuvvetin % 0,1'i veya ölçümdeki en düşük doğrulanmış kuvvetin % 1'i (hangisi daha büyükse) $\pm 0,0$ olmalıdır.

Doğrulama Yöntemlerinin Prosedürleri

Metod A, Standart Ağırlıklarla Doğrulama: Test makinasının kuvvet platformuna veya numune yerine kuvvet ölçüm sisteminde askıya alınan kefe veya diğer bağlantı aparatları ile uygun tasarımı, temiz ve ayarlı standart metal ağırlıklar yerleştirilerek yapılır. Ağırlıklar % 0,1 doğruluk ve beş yıllık periyotlarla kalibre edilmiş olmalıdır. Ağırlıklar artan şekilde veya hem artan hem de azalan şekilde sisteme yerleştirilir ve çıkartılırlar. ASTM E4 Bölüm 8'e göre yerçekimi ve havanın kaldırma kuvvetine göre düzeltilmiş kuvvetler kullanılarak alınan veriler kayıd edilir.

Metod B. Eş Kollu Terazi ve Standart Ağırlıklarla Sertlik Test Cihazlarının Doğrulaması: Teraziyi, kalibre edilen test makinasının batıcı ucuna, eş kollu terazinin bir tavası üzerinde ortalanmış dayanacak şekilde konumlandırılır. Batıcı uç normal olarak hareket halindeyken bu kısım denge konumundadır. Batıcı ucun yükünü dengelemek için karşı tavaya gerekliliklere uygun standart ağırlıklar yerleştirilerek uygulanır. Sertlik test etme makinası batıcı ucunun izin verilen hareketi genellikle çok küçük olduğundan, terazinin salınmamasına dikkat edilmelidir.

Kesirli ağırlık kombinasyonlar kullanarak, hem ardışık 10 adet ölçümün her biri sırasında test makinesi batıcı uç kuvveti tarafından kaldırılabilen ölü ağırlık kuvvetinin maksimum değeri, hem de 10 adet herhangi biri sırasında kaldırılamayan minimum kuvvet değeri ardışık denemeler ile ölçülür. Batıcı uç kuvvetinin doğru değeri bu iki değerlerin ortalaması olarak alınır. İki değer arasındaki fark ortalama değer % 0,5'ini geçmemelidir.

Metod C, Kuvvet Ölçüm Cihazı ile Doğrulama:

Sıcaklık Dengelemesi

Bir test makinasını doğrulamak için kuvvet ölçüm cihazı kullanırken, cihazın tepkisinin kararlı olmasını sağlamak için doğrulamadan önce test makinasına yakın veya tercihen test makinası üzerine yeterli bir süre yerleştirilmelidir.

Doğrulama sırasında, kalibre edilmiş bir termometreyi cihaza mümkün olduğunca yakına yerleştirerek, kuvvet ölçüm cihazlarının sıcaklığını $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$] içinde olduğu sağlanmalıdır.

Doğal bir sıcaklık dengeleme özelliğine sahip olmayan kuvvet ölçüm cihazları, ortam sıcaklığı ile kalibrasyona atıfta bulunulan sıcaklık arasındaki fark için matematiksel olarak düzeltilmelidir. Sıcaklık düzeltme katsayıları (varsa) kuvvet ölçüm cihazının üreticisi tarafından sağlanmalıdır.

Prosedür

Kuvvet ölçüm cihazı, test makinasının çenelerinin merkez çizgisine denk gelecek şekilde test makinasına yerleştirilir. Kuvvet ölçme cihazının yükleme aralığı için izin verilen alt kuvvet limiti ve ASTM E74 göre Sınıf A doğrulama değeri dikkate alınmalıdır. Her bir kuvvet ölçüm cihazı sadece kendi Sınıf A kuvvet aralığında kullanılmalıdır.

Ön yükleme amacıyla, test makinasına maksimum doğrulama kuvvetini uygulanır ve sıfır kuvvete dönülür. Bu işlem test makinası göstergesi sıfırlanır ve tekrarlanır. Test makinasının kuvvet göstergesinin sıfır kuvvette dengeyi sağlaması için yeterli süre beklenir ve işlem gerektiği kadar tekrarlanır. Doğrulama işlemi sırasında kuvvet yönü değiştirildiğinde, ön yükleme aynı şekilde tekrar uygulanır.

Kuvvet ölçme cihazlarını doğrulamadaki kullanımında 2 yöntem vardır:

- **Kuvvet Takip Yöntemi:** Kuvvet ölçme cihazı üzerindeki kuvvet, test makinasının kuvvet göstergesi nominal bir değere ulaşana kadar takip edilir. Kuvvet değeri kuvvet ölçme cihazından okunur.
- **Kuvvet Ayarlama Yöntemi:** Nominal kuvvet, kuvvet ölçüm cihazında önceden ayarlanmıştır ve kuvvet ölçüm cihazındaki nominal kuvvet değerine ulaşıldığında test makinasının kuvvet göstergesindeki değer okunur.

Uygun kuvvet adımları seçtikten sonra, hem test makinası hem de kuvvet ölçüm cihazı için sıfır değerleri okunur ve tüm doğrulama ölçümleri sırasında kuvvet yavaş bir şekilde uygulanır.

Doğrulamanın Hesaplamaları

Test makinasının ölçüm aralığı içindeki kuvvetlerin yüzde hatası $\pm \% 1.0$ 'ı geçmemelidir. Aynı kuvvete sahip iki seri ölçümleri arasındaki fark yani tekrarlanabilirlik hatası da $\pm \% 1.0$ 'ı geçmemelidir.

Bir test makinasının doğrulanma raporu, makinanın kabul edildiğini veya reddedildiğini bildirmek yerine, hangi doğrulanmış kuvvetler aralığında kullanılabileceğini ifade eder. Birden fazla kapasite aralığına sahip makinalarda, her birinin doğrulanmış kuvvet aralığı belirtilmelidir. Hiçbir durumda, doğrulanmış kuvvet aralığı, doğrulama testi sırasında uygulanan kuvvet aralığının dışındaki kuvvetleri içerecek şekilde belirtilmez.

Test makinalarında, alıcılar / sahipler / kullanıcılar veya ürün özellik grupları daha büyük veya daha küçük hata sistemlerine ihtiyaç duyabilir veya bunlara izin verebilir. $\pm \% 1.0$ 'den büyük yüzde hata veya $\pm \% 1.0$ 'den büyük tekrarlanabilirlik hatasına sahip makinalar ASTM E4 ile uyumlu değildir.

Doğrulamalar Arasındaki Zaman Aralığı

Test makinalarının yıllık veya gerekirse daha sık doğrulanması tavsiye edilir. Hiçbir durumda, doğrulama arasındaki zaman aralığı 18 ayı geçemez (uzun süreli testin 18 aylık sürenin ötesine geçtiği makineler hariç). Bu gibi durumlarda makina, testin tamamlanmasından sonra doğrulanmalıdır.

Doğrulamalar Arasındaki Ölçüm Doğruluğunun Güvencesi

Bazı ürün test prosedürleri, bir test makinasının doğrulamaları arasında doğru kuvvet değerleri üretebildiğinden emin olmak için günlük, haftalık veya aylık nokta kontrolleri gerektirebilir.

Nokta kontrolleri, A, B ve C Metotlarına uygun şekilde bir kuvvet ölçüm standardı kullanılarak ilgi aralıklarında veya ilgili kuvvet seviyelerinde yapılabilir. Kuvvet ölçüm cihazları ile nokta kontrollerinin yapıldığı kuvvet seviyeleri için ASTM E74'e göre Sınıf A gereksinimlerini karşılamalıdır.

Malzeme tedarikçisi / kullanıcı tarafından aksi kararlaştırılmadıkça veya şart koşmadıkça bir ölçüm aralığına yaklaşık % 20 ve % 80'inde yerinde kontroller yapılabilir.

Nokta kontrolünde, test makinasının hatası, uygulanan kuvvetlerin $\pm$ % 1,0'ını geçmemelidir. Kuvveti seviyelerinden herhangi birinde hataların $\pm$ % 1,0'dan fazla olması durumunda, test makinasının hemen doğrulama yaptırılması gereklidir.

Nokta kontrolleri yapmak için kullanılan kalibrasyon cihazlarının adı, seri numarası, doğrulama tarihi, kontrol yapan kişinin adı, doğrulama laboratuvarı ve minimum ASTM E74'e göre Sınıf A değerini içeren nokta kontrol testlerinin bir kaydının tutulması gereklidir.

Rapor ve Sertifika

ASTM E4'e göre bir test makinasının doğrulama sertifikası veya raporu açık, eksiksiz ve hatasız olarak aşağıdaki bilgileri içermelidir.

- a) Doğrulamayı yapan laboratuvarın adı,
- b) Doğrulama tarihi,
- c) Test makinasının tanımı, seri numarası ve yeri,
- d) Doğrulanen kuvvet gösterge sistemlerini tanımlayan beyan,
- e) Doğrulama yönü; basma, çekme veya çekme – basma
- f) Test makinasının her bir kuvvet gösterge sisteminin doğrulanmış kuvvet aralığı ve ilgili çözünürlük değerleri,
- g) Test makinasının gösterge kuvveti ve her bir doğrulama kuvvetindeki her seri için doğrulama cihazındaki kuvvet değeri,
- h) Her seriden sonra, her bir kuvvet aralığı için sıfır değeri,
- i) Makina hatası, kuvvetin yüzde hatası ve her doğrulama kuvvetindeki seriler arasındaki fark, (tekrarlanabilirlik)
- j) Onaylanan her kuvvet aralığı için yüzde olarak maksimum hata,
- k) Kullanılan doğrulama metodu,
- l) Doğrulamanın ASTM E4-XX'e uygun olarak yapıldığına dair beyan. Doğrulamanın, ASTM E4'ün en son yayınlanan sayısına uygun olarak yapılması tavsiye edilir,

- m) Üretici, seri numarası, doğrulama laboratuvarı, doğrulama tarihi, gelecek doğrulama tarihi ve doğrulama için kullanılan tüm kuvvet ölçüm cihazlarının ASTM E74 uyarınca Sınıf A yükleme aralığının sınırları,
- n) Doğrulama için kullanılan kuvvet ölçüm cihazlarının sıcaklığı ve hesaplanan kuvvetlerin gerektiğinde sıcaklığının düzeltildiğine dair bir açıklama,
- o) Doğrulama için kullanılan tüm standart ağırlıkların veya ağırlık setlerinin üretici, seri numarası, doğrulama laboratuvarı, doğrulama tarihi ve gelecek doğrulama tarihi,
- p) Doğrulama yapan kişi(ler),
- q) Doğrulamadan sorumlu kişinin adı ve imzası
- r) İsteğe bağlı olarak veya gerekiyorsa, doğrulamanın ölçüm belirsizliği değeri, (ASTM E4 Ek X2'e göre)
- s) Doğrulama kurumu tarafından oluşturulan her Rapor ve Sertifika belgesi benzersiz bir şekilde tanımlanmalıdır. Sayfaların raporun ve sertifikanın bir parçası olarak tanınmasını sağlamak için sayfa numaralarını, toplam sayfa sayısını veya belgenin sonunu belirtmek için bir işaret eklenmelidir.

4.26. ASTM E4'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, ASTM E4 standardının Ek X2 kısmında detaylı olarak açıklanmıştır.

ASTM E4 standardına göre belirlenen ölçüm belirsizliği, bir malzeme test makinasının doğrulanması sırasında bildirilen hataların ölçüm belirsizliğidir. Malzeme test makinasının ölçüm belirsizliği veya malzeme test makinası kullanılarak belirlenen test sonuçlarının ölçüm belirsizliğinin olmadığı belirtilmiştir.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu ASTM E4 standardına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, çözünürlük, referans standart) bileşenler hesaplanır. Aşağıda bu büyüklükler ve bunlara ait tahmini istatistiksel dağılım fonksiyonları verilmiştir. Bu dağılım fonksiyonlarının seçimi deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Buna göre, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu ölçümünde bileşik belirsizlik EN ISO 7500-1 standardına benzer şekilde aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} \quad (45)$$

Geniştirilmiş bağıl belirsizlik ise;

$$U = k \cdot u_c = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} \quad (46)$$

Eşitliklerdeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

u_i : bağıl ölçüm belirsizliği bileşenini,

u_c : cihazın toplam bağıl ölçüm belirsizliğini

k : kapsam faktörü,

U : toplam genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğini ifade eder.

Bu parametrelerin hesabına aşağıda detaylı olarak yer verilmiştir.

Normal koşullar altında, ASTM E4 standardına uygun yapılan bir doğrulama sırasında belirlenen ölçüm belirsizliği üç ana bileşenden oluşur. Doğrulamayı yapan kalibrasyon laboratuvarı ile ilişkili ölçüm belirsizliği, doğrulamada belirlenen malzeme test makinasının tekrarlanabilirliği ve malzeme test makinasının kuvvet göstergesinin, hatanın belirlendiği kuvvet değerinde ve sıfır kuvvet değerindeki çözünürlüğünün belirsizliğidir.

Doğrulamayı yapan kalibrasyon laboratuvarı ile ilişkili ölçüm belirsizliği

Doğrulamayı yapan kalibrasyon laboratuvarı ile ilişkili ölçüm belirsizliği, aşağıda verilen faktörleri içerebilir. Ancak bunlarla sınırlı olmayan faktörlerin bir kombinasyonudur. Etkili faktörler:

- ASTM E74 standardına göre laboratuvarın kuvvet standartlarının ölçüm belirsizliği,
- Sıcaklık değişimleri gibi çevresel etkiler,
- Standart ağırlıklar kullanılırken doğrulamanın yapıldığı yerde yerel yerçekimi ivmesi için kullanılan değerdeki belirsizlik,
- Kuvvet standardının uzun süreli sapması,
- Kuvvet standardının doğrulanmasının ölçüm belirsizliği,
- Elleçleme ve sabitleme nedeniyle kuvvet standardının tekrar üretilebilirliği

olarak ASTM E4 Ek X2'de belirtilmiştir.

Bir laboratuvarın ölçüm belirsizliği, kullanılan kuvvet standartlarının maksimum belirsizliğine ve izin verilen en kötü çevresel koşullara dayanmalıdır. Doğrulamanın laboratuvarın normal çalışma parametreleri dışındaki koşullar altında gerçekleştirildiği durumlar varsa, ek bileşenlerin dikkate alınması gerekebilir. Örneğin, bir laboratuvar doğrulama sırasında 5°C'lik bir sıcaklık değişimine izin verebilir ve bunu ölçüm belirsizlikleri olarak hesaba katmıştır.

Daha büyük sıcaklık değişimleri meydana geldiğinde, bu artan sıcaklık değişmesine bağlı belirsizlik, ölçüm belirsizliğinin belirlenmesine dahil edilmelidir.

Bir kalibrasyon laboratuvarının ölçüm belirsizliği genellikle kapsama faktörü ($k = 2$) kullanılarak genişletilmiş bir belirsizlik olarak ifade edilir. Bu durumda, diğer belirsizlik bileşenlerine ilave edilmeden önce, standart belirsizliği belirlemek için ikiye bölünmelidir.

Doğrulamada kullanılan kalibrasyon laboratuvarının referans cihazının ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{std} = \frac{U_{std}}{2} \quad (47)$$

Burada,

U_{std} : Kalibrasyon laboratuvarının referans cihazının genişletilmiş ölçüm belirsizliğini ifade eder.

Malzeme test makinasının tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği

Doğrulama işlemi sırasında tekrarlanabilirlikten kaynaklanan ölçüm belirsizliğini belirlemenin bir yolu, iki seri ölçüm değerleri (tekrarlanabilirlik) arasındaki farkları değerlendirmektir.

Her bir kuvvet adımı için, bu doğrulama noktasının birinci ve ikinci serilerdeki doğrulama noktasına en yakın 4 doğrulama kuvvet adımları arasındaki hata farklılıklarının karelerinin toplamı bulunur. Doğrulama işlemi sırasında tekrarlanabilirlik nedeniyle belirsizlik hakkında bir tahmin elde etmek için bu toplam 10'a bölünür ve sonucun karekökü alınarak hesaplanabilir. Sonucun 10'a bölünmesindeki neden, toplam beş adet okuma olduğundan ve her çiftin varyansı ikiye bölünen farka eşit olduğu için toplam 10'a bölünür.

Doğrulamada işleminde tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği (u_{rep}) bileşeni aşağıdaki eşitlik ile kuvvet birimde (örneğin N) hesaplanır.

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{b_{n-2}^2 + b_{n-1}^2 + b_n^2 + b_{n+1}^2 + b_{n+2}^2}{10}} \quad (48)$$

Burada,

b_n : Doğrulama işlemindeki tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği hesaplanması istenen kuvvet adımının tekrarlanabilirlik hatası değeri

$b_{n-1, n-2, n+1, n+2}$: Doğrulama işlemindeki tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği hesaplanması istenen kuvvet adımının bir önceki (iki önceki, bir sonraki, iki sonraki) kuvvet adımındaki tekrarlanabilirlik hatası değerini ifade eder.

Malzeme test makinasının çözünürlük ölçüm belirsizliği

Genellikle tekrarlanabilirlik nedeniyle ortaya çıkan ölçüm belirsizliğinin yukarıdaki şekilde değerlendirmesi, test makinasının çözünürlüğüne bağlı belirsizliği de içerecektir. Bununla birlikte, çözünürlüğün etkilerini görmeden çalışmaları tekrarlamak mümkündür. Her bir kuvvette, tekrarlanabilirliğe bağlı belirsizliğin test makinasının çözünürlüğüne bağlı ölçüm belirsizliğinden daha büyük olduğunu tespit etmek gereklidir. Belirli bir doğrulama kuvvetinde tekrarlanabilirliğe bağlı ölçüm belirsizliği, test makinasının çözünürlüğüne bağlı belirsizlikten küçük ise, bu doğrulama kuvveti için test makinasının çözünürlüğü nedeniyle belirsizlik bileşenleri toplam belirsizlik hesabına dahil edilmelidir. Aksi durumda dahil edilmez.

Malzeme test makinasının her bir doğrulama kuvvetinde çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik, aşağıdaki iki bileşenin karelerinin toplamının kareköküdür. Bu bileşenler:

- 1) Doğrulan malzeme test makinasının kuvvet göstergesinin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşeni, belirsizliğin değerlendirildiği kuvvetteki kuvvet göstergesinin çözünürlüğünün $2\sqrt{3}$ 'e bölünmesiyle belirlenebilir.
- 2) Malzeme test makinasının kuvvet göstergesinin sıfır kuvvette çözünürlüğüne bağlı belirsizlik bileşeni, kuvvet göstergesinin sıfır kuvvette çözünürlüğünün $2\sqrt{3}$ 'e bölünmesiyle belirlenebilir.

Kalibrasyonu yapılan malzeme test makinasının kuvvet gösterge ekranının çözünürlüğü ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{res} = \sqrt{\left(\frac{r_F}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{r_Z}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (49)$$

Burada,

r_F : Malzeme test makinası kuvvet göstergesinin uygulanan her bir yükteki çözünürlük değeri,

r_Z : Malzeme test makinası kuvvet göstergesinin sıfır yük değerindeki çözünürlük değerini ifade eder.

Bileşik Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, u_c :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik ölçüm belirsizlik değeri aşağıdaki 50 nolu eşitlik ile hesaplanır. Ancak aşağıdaki şart kontrol edilir. Eğer $u_{rep} < u_{res}$ ise u_{res} değeri hesaba dahil edilir. Diğer durumda $u_{res} = 0$ olarak alınır.

$$u_{rep} \geq u_{res} \rightarrow u_{res} = 0$$

$$u_c = \sqrt{u_{std}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \quad (50)$$

Geniştirilmiş Bağlı Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, U :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliğinin hesabı, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için ($k=2,0$) değerinde alınması ve kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi çerçevesinde, hesaplanan bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı olarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$U = k \cdot u_c$$

4.27.ASTM E4'e Göre Ölçüm Belirsizliği Hesabının Sayısal Uygulaması

ASTM E4 standardına uygun olarak yapılan ölçüm belirsizliği hesap örneği olarak 10.000 N kapasiteli bir malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonrası alınan sonuçlardan ölçüm belirsizliği 2000 N kuvvet adımı için belirlenecektir. Kalibrasyon laboratuvarının referans cihazının genişletilmiş ölçüm belirsizliği % 0,3 olarak verilmiştir. Test makinasının 2000 N kuvvet adımındaki çözünürlüğü 5 N, aynı makinanın 0 N kuvvetinde yani yüksüz konumdaki çözünürlüğü ise yine 5 N'dur. Malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin, ASTM E4 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu sonucunda elde edilen ölçüm verileri Tablo 4.28'de verilmiştir.

Tablo 4.28. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

1. Seri			2. Seri			Tekrarlanabilirlik, b	
F _{i1}	F ₁	Hata, q ₁	F _{i2}	F ₂	Hata, q ₂		
N	N	%	N	N	%	%	N
0	0	-	0	0	-	-	-
100	100,24	-0,24	100	100,02	-0,02	0,22	0,22
200	200,21	-0,10	200	200,23	-0,11	0,01	0,02
400	400,19	-0,05	400	400,37	-0,09	0,04	0,18
700	699,98	0,00	700	700,12	-0,02	0,02	0,14
1000	1000,15	-0,01	1000	1001,15	-0,11	0,10	1,00
2000	1998,84	0,06	2000	1995,33	0,23	0,17	3,40
4000	3994,31	0,14	4000	3988,20	0,30	0,16	6,40
7000	6981,07	0,27	7000	6979,86	0,29	0,02	1,40
10000	9989,00	0,11	10000	9967,54	0,33	0,22	22,00

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{std}), yukarıda genişletilmiş ölçüm belirsizliği olarak verildiği için belirsizlik değerinin yarısı olarak bulunur. Bu değer 2000 N kuvvet basamağı için aşağıdaki gibi N birimde hesaplanır.

$$u_{std} = \frac{U_{std}}{2} = \frac{0,3}{2} \cdot \frac{2000}{100}$$

$u_{cal} = 3 \text{ N}$ olarak bulunur.

2000 N kuvvet basamağındaki her bir artan ölçüm serisi için, bağıl doğruluk hatası (q_1 , q_2) değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$q_1 = \frac{F_{1i} - F_1}{F_1} \cdot 100 = \frac{2000 - 1998,84}{1998,84} \cdot 100 = \% 0,06$$

$$q_2 = \frac{F_{2i} - F_2}{F_2} \cdot 100 = \frac{2000 - 1995,33}{1995,33} \cdot 100 = \% 0,23$$

2000 N kuvvet basamağı için hesaplanan bağıl doğruluk hatası değerlerinin farkı alınarak ölçümün bağıl tekrarlanabilirlik hatası (b) aşağıda gösterildiği gibi belirlenir.

$$b = |q_1 - q_2| = |0,06 - 0,23| = \% 0,17$$

$$b = \frac{0,17 \cdot 2000}{100} = 3,4 \text{ N}$$

Tekrarlanabilirlik belirsizlik bileşenini bulabilmek için 2000 N kuvvet adımına yakın 4 kuvvet adımı içinde mutlak tekrarlanabilirlik hatalarını belirlenmesi gereklidir. Aşağıdaki şekilde bulunur.

$$b_{700} = |q_1 - q_2| = |0,00 - (-0,02)| = \% 0,02$$

$$b_{700} = \frac{0,02 \cdot 700}{100} = 0,14 \text{ N}$$

$$b_{1000} = |q_1 - q_2| = |-0,01 - (-0,11)| = \% 0,10$$

$$b_{1000} = \frac{0,10 \cdot 1000}{100} = 1,0 \text{ N}$$

$$b_{4000} = |q_1 - q_2| = |0,14 - 0,30| = \% 0,16$$

$$b_{4000} = \frac{0,16 \cdot 4000}{100} = 6,4 \text{ N}$$

$$b_{7000} = |q_1 - q_2| = |0,27 - 0,29| = \% 0,02$$

$$b_{7000} = \frac{0,02 \cdot 7000}{100} = 1,4 \text{ N}$$

2000 N kuvvet basamağı için tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği (u_{rep}) bileşeni aşağıdaki şekilde N birimde hesaplanır.

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{b_{700}^2 + b_{1000}^2 + b_{2000}^2 + b_{4000}^2 + b_{7000}^2}{10}} = \sqrt{\frac{0,14^2 + 1,0^2 + 3,4^2 + 6,4^2 + 1,4^2}{10}}$$

$u_{rep} = 2,3 \text{ N}$ olarak bulunur.

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşenini (u_{res}) hesaplamak için öncelikle tek eksenli statik malzeme test makinasının bağıl çözünürlük hatasının belirlenmesi gerekir. Bu örnekte, malzeme test makinasının çözünürlüğü (r), tüm kuvvet değerleri için 5 N alınmıştır. Bu nedenle 2000 N'luk kuvvet değeri için, malzeme test makinasının kuvvet gösterge ekranının uygulanan her bir yükteki çözünürlük değeri (r_F) ve sıfır yük değerindeki çözünürlük değeri (r_Z) kullanılarak çözünürlük ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{res}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{res} = \sqrt{\left(\frac{r_F}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{r_Z}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{5}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{1,4^2 + 1,4^2}$$

$u_{res} = 2 \text{ N}$ olarak bulunur.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik ölçüm belirsizlik değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

Ancak aşağıdaki şart kontrol edilir. Eğer $u_{res} < u_{rep}$ ise hesaba dahil edilir. Diğer durumda $u_{res} = 0$ olarak alınır.

$$u_{rep} \geq u_{res} \rightarrow 2,3 \text{ N} \geq 2 \text{ N olduğu için} \rightarrow u_{res} = 0$$

$$u_c = \sqrt{u_{std}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} = \sqrt{3^2 + 2,3^2 + 0^2}$$

$u_c = 3,8 \text{ N}$ olarak bulunur.

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 3,8$$

$U = 7,6 \text{ N}$ olarak bulunur.

$$U = \frac{7,6 \cdot 100}{2000}$$

$U = \% 0,38$ bağıl genişletilmiş ölçüm belirsizliği değeri olarak bulunur.

4.28. EN 12390-4'e Göre Beton Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu

Ülkemizde, standarda uygun beton üretiminin yapılabilmesi için, beton üreticilerinin ve test yapan laboratuvarların ilgili standarda uygun beton test makinalarına sahip olmaları gerekmektedir. Beton test makinalarının uygun olup olmadığına ise, bu cihazların ilgili standarda göre muayene ve kalibrasyonu yapılarak karar verilebilmektedir.

Genel olarak malzeme test makinalarının kuvvet ölçme sistemlerinin doğrulamaları, Avrupa Birliği standartları içerisinde yer alan EN ISO 7500-1 standartlarına göre gerçekleştirilmektedir. Bu standartlar Türk Standartları Enstitüsü tarafından TS EN ISO 7500-1 olarak Türkçeleştirilmiştir. EN 12390-4 (2000) standardının yayınlanmasından sonra ise, beton test makinalarının kuvvet doğrulamasında esas alınması önerilmiştir.

Standard 2002 yılında "TS EN 12390-4, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 4: Basınç Dayanımı - Deney Makinalarının Özellikleri" standardı olarak Türkçeleştirilmiştir. EN 12390-4 standardının 2019 yılında da yeni versiyonu yayınlanmıştır.

EN 12390-4 standardın 2000 versiyonu 6 bölüm ve Ek A ve B olarak 2 ek bölümden oluşuyordu. 2019 yılında yapılan değişiklikle standart 5 bölüm ve Ek A olarak 1 ek bölüm yapısını almıştır. Standardın giriş kısmında EN 12390-4: 2019 ile EN 12390-4: 2000 standardına göre aşağıdaki önemli değişiklikleri içerdiği ifade edilmiştir:

- Tekrarlamayı önlemek için standart EN ISO 7500-1 ile uyumlu hale getirilmiştir.
- Beton test deney makinalarının kuvvet kalibrasyon değerlendirmesinin Sınıf 1 olması gereklidir. Ancak, 2000'den önce üretilmiş makinaların kuvvet kalibrasyonu değerlendirmesinin Sınıf 2 olarak kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir.
- Doğrulama noktalarında ve çalışma aralığında yeni kabul limitlerinde artış yapılmıştır.
- Uzama ölçerli sütunun (4 köprülü kuvvet ölçüm cihazı) için doğrulama prosedürü açıklanmıştır.
- Ek B kısmı silinmiştir.

Kuvvet Kalibrasyonu

Beton test makinalarının kuvvet kalibrasyonu EN ISO 376(2002) standardına göre kalibre edilmiş ve sınıf değeri doğrulama işlemi uygulanacak makinanın sınıfına eşit veya daha iyi olan bir kuvvet dönüştürücü ile gerçekleştirilir. Kuvvet kalibrasyon yöntemi ve değerlendirilmesi konusunda EN ISO 7500-1 standardının esas alınması aynı prosedür ve sınıflandırmanın uygulanması EN 12390-4 standardında tanımlanmıştır. Bu kalibrasyon yöntemi diğer bölümde açıklanmıştır.

Beton test makinalarının EN 12390-4 standardına göre sadece kuvvet kalibrasyonlarının yapılması yerine ilave olarak kuvvet transferinde farklı ölçümler ile doğrulanması tarif edilmiştir. Standardın madde 4.4.4'te doğrulama amacıyla kullanılacak olan kuvvet transfer doğrulama cihazının (uzama ölçerli kolon tip) Ek A'da belirtilen şekilde kullanılması gerekliliği belirtilmiştir. Bu cihaz kullanılarak aşağıda sıralanan üç doğrulamanın yapılması ve ölçülen beton test makinasının bu şartları sağlaması istenmiştir.

Bunlar:

- Makinanın bileşen parçalarının hizalanması,
- Üst yükleme başlığının kendi kendine hizalanması,
- Üst yükleme başlığının hareketinin sınırlandırılmasıdır.

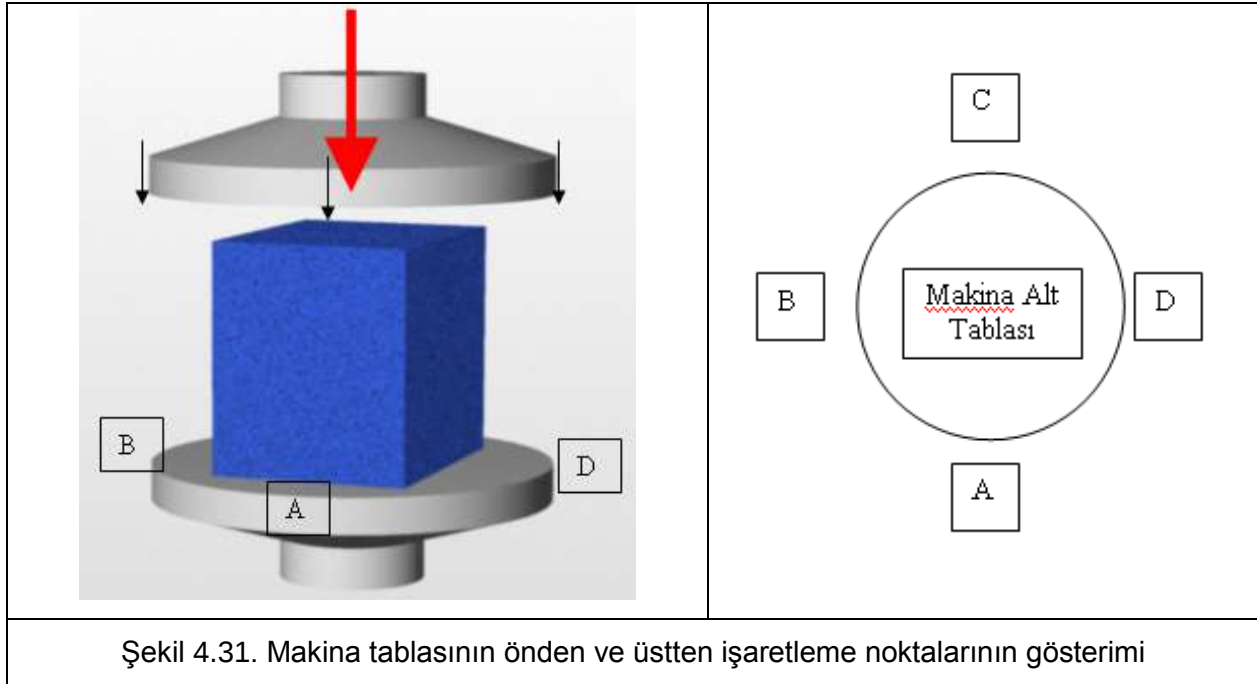
Bu doğrulamalar için sınır değerler Tablo 4.29'da aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.29. Basma test makinaları için doğrulama sınırları

Kuvvet	Test makinasının gereklilik sınırları		
	Makina parçalarının eksenlenmesi	Üst yükleme başlığının kendi kendine hizalanması	Üst yükleme başlığının hareketinin sınırlandırılması
	Maksimum müsaade edilen ortalama uzama oranı	Maksimum müsaade edilen uzama oranındaki fark	Maksimum müsaade edilen uzama oranı, her yer değiştirme mm sindeki
kN	Rn	ΔRn	W _{ac} veya W _{bd}
200	± 0.15	0.15	0.06
400 (zorunlu değil)	± 0,10	0,10	0,05
800			0,04
1600 (zorunlu değil)			
2000 *			
* Eğer makinanın maksimum kapasitesi 2000 kN düşük ise makinanın maksimum kapasitesi			

Makina Üst Yükleme Başlığının Kendiliğinden Ayarlanmasının Ve Makina Bileşenleri Doğrultularının Kontrolü

Kalibre edilen beton test presine ait üst yükleme başlığının eksenden kaçıklıkları kendiliğinden doğru şekilde ayarladığının ve makina bileşen parçaları doğrultularının doğru olduğunun belirlenebilmesi amacıyla bu kontroller yapılır. Bu ölçüm için kalibre edilecek beton test makinasının başlık plakasının kenar orta noktaları ; A, B, C ve D harfleri (Şekil 4.31) ve kalibrasyon referans kuvvet dönüştürücü cihazının dört adet köprü konumları da 1,2,3 ve 4 rakamları kullanılarak işaretlenir. (Şekil 4.32)



Kalibre edilecek cihaza, referans kuvvet dönüştürücünün üst yüzü ile makina üst yükleme başlığı arasında yaklaşık olarak 5 mm aralık kalacak şekilde konumlandırılır. Daha sonra üst yükleme başlığı, BD ekseninden A noktasına doğru cihaza temas edinceye kadar yatırılır veya eğilir. Makina üst yükleme başlığı dikkatlice serbest bırakılır ve başlık cihaza tam oturuncaya kadar makina çalıştırılır. Cihazdan okunan gösterge yükü, düzgün şekilde artmak üzere, en az 200kN yük uygulanır.

Bu noktada yük sabit tutulur ve referans kuvvet dönüştürücünün dört köprüsünden gösterge değerleri alınır. Uygulanan yük, sabitleme öncesinde 200 kN'u geçerse, 220 kN'dan fazla olmadıkça, gösterge değeri okunabilir. Yükün, 220 kN'u aşması durumunda işlem tekrarlanır.

Aynı işlem üst yükleme başlığının, BD eksenini etrafında C noktasına doğru, daha sonrada AC eksenini etrafında B noktasına ve son olarakda D noktasına doğru eğilerek tekrarlanır. Her nokta için referans kuvvet dönüştürücünün gösterge değerleri kaydedilir.

A noktasına doğru üst yükleme başlığının eğilmesi durumunda 200kN kuvvet değerinde referans kuvvet dönüştürücüden alınan gösterge değerleri Tablo 4.30'de verilmiştir. Bu değerlere göre referans kuvvet dönüştürücünün 1. köprü değerinin birim şekil değiştirme miktarına oranı, aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$R_{n1} = (R_1 - R_{ort}) / R_{ort}$$

R_{n1} : Köprüden okunan birim şekil değişimi oranı

R_1 : 1. köprüden okunan birim şekil değişimi değeri

R_{ort} : Okunan birim şekil değişimi değerlerinin ortalaması

Diğer köprüler içinde aynı formül ile diğer birim şekil değiştirme oranları hesaplanır. B,C ve D noktaları içinde aynı işlemler tekrarlanarak Tablo 4.31 oluşturulur. Tablo 2'den görüldüğü gibi birim şekil değişim oranları arasındaki en büyük fark ve ortalama birim şekil değiştirme oranının en büyük değerleri EN 12390-4 standardında verilen Tablo 4.29'e göre değerlendirilir.

Tablo 4.30. A noktasına doğru başlık eğilmiş durumdaki kuvvet dönüştürücü gösterge değerleri

Kuvvet dönüştürücü kanalları	A noktası (F: 200 kN)	
R_1	0,12881	mV/V
R_2	0,14207	mV/V
R_3	0,14776	mV/V
R_4	0,13056	mV/V
R_{ort}	0,13730	mV/V

Tablo 4.31. Birim şekil değiştirme oranlarının hesaplanan değerleri

	A noktası	C noktası	B noktası	D noktası	$R_{n_{max}}-R_{n_{min}}$	ΔR_n
e_1	-0,0618	-0,0413	-0,0644	-0,0529	0,0231	-0,0551
e_2	0,0347	0,0157	0,0375	0,0244	0,0217	0,0281
e_3	0,0762	0,0957	0,1022	0,1121	0,0359	0,0965
e_4	-0,0491	-0,0703	-0,0753	-0,0837	0,0346	-0,0696
En büyük değer					0,0359	0,0965

Kuvvet kN	Maksimum müsaade edilen uzama oranındaki fark ΔR_n	Maksimum müsaade edilen ortalama uzama oranı R_n
200	0,0359	0,0965
2000	-	-

Makinanın Üst Yükleme Başlığı Hareket Sınırlanmasının Kontrol İşlemi

Kalibre edilecek beton test presinin üst yükleme başlığının hareket sınırlaması kontrolü için, öncelikle referans kuvvet dönüştürücü, merkezi konumdan AC hattı boyunca A noktasına doğru ($6 \pm 0,05$) mm ötelenir. Bu sayede presin eksenden kaçık bir şekilde yüklenmesi sağlanmış olur. Makina üst yükleme başlığı tekrar ayarlanmadan, başlık cihaza temas edinceye kadar çalıştırılır ve düzgün şekilde sabit hızda yük uygulanır. 200 kN, 800 kN ve 2000 kN (opsiyonel olarak 400 kN ve 1600 kN) nominal kuvvetlerde değerler mümkün olduğunca sabit kalması sağlanarak dört köprüden alınan gösterge değerleri kaydedilir. Makina yükleme kapasitesinin 2000 kN'dan daha küçük olması halinde, okumalar 200 kN ve cihazın en büyük yükleme değerine kadar alınır. Kuvvet değerinin, % 10'u geçmeyecek şekilde sabit tutulması sağlanır. % 10'dan fazla kuvvet değerinin geçilmesi halinde ölçümler tekrarlanır.

Bu ölçümler benzer şekilde referans kuvvet dönüştürücünün merkezi konumdan ($6 \pm 0,05$) mm hareket ettirilme işleminin, önce AC hattı üzerinde C noktasına, daha sonra BD hattı üzerinde B noktasına, son olarak BD hattı üzerinde D noktasına doğru yapılmasıyla tekrarlanır. Birim şekil değiştirme oranı, r ile gösterilir. 1,2,3 ve 4 indisleri, köprülerin birim şekil değiştirme silindiri üzerindeki yerlerini (Şekil 2), a,b,c ve d indisleri (Şekil 1), referans kuvvet dönüştürücünün kendine doğru yaklaştırıldığı noktayı gösterir. Örnek olarak, r_{1a} ; 1 numaralı köprüden, referans kuvvet dönüştürücü A noktasına doğru 6 mm yaklaştırıldığı zaman alınan birim şekil değiştirme oranını gösterir.

A noktasına doğru 6 mm ötelenmiş durumda 200 kN, 800 kN ve 2000 kN kuvvet değerindeki alınan gösterge değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu değerlere göre 1. köprü değerinin birim şekil değiştirme oranı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$R_{01}=(R_1-R_{ort})/R_{ort}$$

C noktasına doğru 6 mm ötelenmiş durumda 200 kN, 800 kN ve 2000 kN kuvvet değerindeki alınan gösterge değerleri Tablo 4.32'de verilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak EN 12390-4 standardında yer alan A.1 ve A.2 formüllerine göre hesaplanan hata değerleri de Tablo 4.33 gösterilmiştir.

Tablo 4.33'den görüldüğü gibi birim şekil değişim oranları arasındaki en büyük fark ve ortalama birim şekil değiştirme oranının en büyük değerleri EN 12390-4 standardında verilen Tablo 1'e göre değerlendirilir.

Tablo 4.32. 200 kN'luk Basma Kuvveti İçin Beton Test Makinası Üst Yükleme Başlığının Hareketinin Sınırlandırılmasının Kontrolü Ölçümü

	A Noktasına Doğru 6 mm Öteleme	B Noktasına Doğru 6 mm Öteleme	C Noktasına Doğru 6 mm Öteleme	D Noktasına Doğru 6 mm Öteleme
Kanal Numarası	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
1	0,12552	0,15043	0,13617	0,13966
2	0,15368	0,12339	0,13316	0,13145
3	0,13871	0,13561	0,12583	0,14421
4	0,13827	0,1356	0,14195	0,12328
Kanalların Ortalama Değeri	0,13905	0,13626	0,13428	0,13465

$$R_{01}=(R_1-R_{ort})/R_{ort}$$

r _{1a}	-0,09727
r _{2a}	0,10525
r _{1c}	0,01409
r _{2c}	-0,00832

r _{3b}	-0,00475
r _{4b}	-0,00483
r _{3d}	0,07100
r _{4d}	-0,08444

$W_{ac} = \frac{(R_{1c} - R_{2c}) - (R_{1a} - R_{2a})}{24}$	$W_{bd} = \frac{(R_{3d} - R_{4d}) - (R_{3b} - R_{4b})}{24}$
---	---

Tablo 4.33. 2000 kN'luk Basma Kuvveti İçin Beton Test Makinası Üst Yükleme Başlığının Hareketinin Sınırlandırılmasının Kontrolü Ölçümü

	A Noktasına Doğru 6 mm Öteleme	B Noktasına Doğru 6 mm Öteleme	C Noktasına Doğru 6 mm Öteleme	D Noktasına Doğru 6 mm Öteleme
Kanal Numarası	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
1	1,22729	1,50977	1,33938	1,38930
2	1,49910	1,21779	1,38577	1,33632
3	1,37495	1,35388	1,24398	1,50058
4	1,34919	1,37371	1,47838	1,22076
Kanalların Ortalama Değeri	1,36263	1,36379	1,36188	1,36174

$$R_{01}=(R_1-R_{ort})/R_{ort}$$

r _{1a}	-0,09932	r _{3b}	-0,00726
r _{2a}	0,10015	r _{4b}	0,00728
r _{1c}	-0,01522	r _{3d}	0,10196
r _{2c}	0,01754	r _{4d}	-0,10353

Tablo 4.34. Beton Test Makinası Üst Yükleme Başlığının Hareketinin Sınırlandırılmasının Kontrol Tablosu

Uygulanan Kuvvet (kN)	Beton Test Makinası Üst Yükleme Başlığının Hareketinin Sınırlandırılması Kapsamında	
	AC Ekseninde Her "mm" İçin Birim Şekil Değiştirme Oranı	BD Ekseninde Her "mm" İçin Birim Şekil Değiştirme Oranı
200	0,009	0,006
2000	0,007	0,009

4.29. EN 12390-4'e Göre Beton Test Makinalarının Ölçüm Belirsizliği Hesabı

EN 12390-4 standardında belirsizlik hesaplaması için herhangi bir tanımlama yapılmamıştır. Kuvvet kalibrasyonu için EN ISO 7500-1 standardına yönlendirmesi nedeniyle belirsizlik hesaplaması EN ISO 7500-1 standardında verildiği şekilde hesaplanmalıdır. EN 12390-4 standardında verilen kuvvet transferi ölçüm yöntemleri bir doğrulama olması nedeniyle ilave bir belirsizlik hesabı gerek yoktur.

4.30. Malzeme Test Makinalarının Dinamik Kuvvet Kalibrasyonu

Bu bölümde, yorulma test makinalarının dinamik kuvvet kalibrasyonu için ASTM E 467 ve MIL-STD-1312B dokümanları esas alınarak kalibrasyon metotları tanımlanmaktadır.

ASTM E 467'e göre MTM Dinamik Kuvvet Kalibrasyonu

Bu standart MTM statik kuvvet kalibrasyonu için ASTM E4 standardını işaret eder. Bu standardın gerekliliklerini (doğruluk seviyesini) karşılayan bir kuvvet ölçme sistemi olmasının gerekli olduğunu ifade eder.

Dinamik kalibrasyonda dikkat edilmesi gerekli en önemli hususlardan biri referans cihazın kalibre edilecek cihaza rijit bir şekilde bağlantısının sağlanmasıdır. Bu bağlantı sağlandıktan ve kısa süre içerisinde çok fazla data alabilen bir gösterge ünitesine sahip olunduktan sonra kalibrasyona başlanabilir.

Dinamik kalibrasyondaki statik ve dinamik kuvvet değerleri için tanımlanmış bir değer yoktur. Müşterinin kullandığı ölçüm aralıklarını kapsayacak şekilde bu kuvvet değerleri belirlenebilir. Frekans değerinin de tüm ölçümlerde sabit tutulması ve mümkün olduğunca küçük değerlerde olması daha çok data yakalanmasını sağlayacağından tercih edilmelidir.

ASTM E467 standardına uygun olarak öncelikle standartta belirtilen bilgilere örnek olarak aşağıdaki Tablo 4.35'de yer alan bilgiler girilir.

Referans kuvvet dönüştürücü dinamik test makinasına rijit olarak uygun bağlantı ile cihaza montajı yapılır. Gevşeyen bağlantı kullanılmamalıdır.

Statik kuvvet doğrulaması için, kalibrasyonu talep eden firma ile birlikte minimum kuvvet değeri ve maksimum kuvvet değerleri belirlenir. Her iki değer % 5 fazlası, kendi değeri ve % 5 eksisi malzeme test makinasından uygulanır ve bu değerlere karşılık referans kuvvet ölçme cihazından alınan değerler kayıt edilir. Bu değerlerden sapma miktarı +/- % 0,25'i geçmemelidir. Bu değerlerden statik doğrulama hata değerleri hesaplanır.

Tablo 4.35. ASTM E 467'e göre dinamik doğrulama verileri örnek giriş tablosu

ASTM E 467'e göre Dinamik doğrulama verileri	
Kalibre edilen cihaz bilgileri	
Üretici:	
Model /Tipi:	
Seri No:	
Cihazın yeri:	
Cihazın Kuvvet Ölçme Cihazı	
Üretici:	
Model /Tipi:	
Seri No:	
Boyutları:	
Gage bilgileri:	
Sıcaklık kompanzasyonu:	
Çeneler arası mesafe (mm) :	
Titreşim izolasyonu (var/yok):	
Kalibrasyonda kullanılan referans cihaz bilgileri	
Referans Kuvvet Ölçme Cihazı	
Üretici:	
Model /Tipi:	
Seri No:	
Maksimum çıkışı (mV/V):	
Gösterge Cihazı	
Üretici:	
Model /Tipi:	
Seri No:	
Besleme voltajı (V):	
Filtre:	

Tablo 4.36. Statik kuvvet doğrulama değerleri örnek tablosu

Uygulanan kuvvet		MTM Gösterge değeri	Referans kuvvet değeri	Hata	
Açıklama	N	N	N	N	%
minimum kuvvet değerinin +%5 fazlası	1050	2842,9	2862,2	19,3	0,67
minimum kuvvet değeri	1000	1957,9	1976,4	18,5	0,94
minimum kuvvet değerinin -%5 eksiği	950	1077,9	1099,4	21,5	1,96
maksimum kuvvet değerinin +%5 fazlası	21000	18715,9	18698,9	-17	-0,09
maksimum kuvvet değeri	20000	19580	19579,2	-0,8	0,00
maksimum kuvvet değerinin -%5 eksiği	19000	20480,7	20461,9	-18,8	-0,09

Dinamik kuvvet doğrulaması için, kalibrasyonu talep eden firma ile birlikte dinamik kuvvet değerleri, dalga şekli ve frekans değerleri belirlenir. Daha sonra belirlenen frekans değerlerinde dinamik kuvvet değeri uygulanır ve alınan datalardan hata değerleri hesaplanır.

Tablo 4.37. Dinamik kuvvet doğrulama değerleri örnek tablosu

Frekans	Uygulanan kuvvet	Maksimum hata			Genişlik hatası		
Hz	N	Okunan değer N	N	%	Okunan değer N	N	%
1	1000	1019	19	1,86	1014	14	1,38
2,5	1000	1019	19	1,86	1015	15	1,48
5	1000	1019	19	1,86	1016	16	1,57
10	1000	1019	19	1,86	1017	17	1,67
20	1000	1019	19	1,86	1018	18	1,77
25	1000	1019	19	1,86	1019	19	1,86
30	1000	1019	19	1,86	1020	20	1,96
40	1000	1019	19	1,86	1021	21	2,06
60	1000	1019	19	1,86	1022	22	2,15
80	1000	1019	19	1,86	1024	24	2,34

Frekans	Data/saniye	Test süresi	Dalga şekli	Ortalama kuvvet
Hz	- / s	s	-	N
1	1000	5	sinüs	10780
2,5	2000	2,5	sinüs	10780
5	2500	2	sinüs	10780
10	3000	1,667	sinüs	10780
20	4000	1,25	sinüs	10780
25	5000	1	sinüs	10780
30	6000	0,833	sinüs	10780
40	7000	0,714	sinüs	10780
60	7000	0,714	sinüs	10780
80	7000	0,714	sinüs	10780

Tüm alınan datalar ASTM E467 standardında verilen formüllere uygun olarak hesaplanır. Dinamik maksimum hata ve genişlik hatası değerleri $\pm$ % 1'i geçmemelidir. Bu şart sağlandığı takdirde cihaza uygunluk verilir.

MIL-STD-1312B standardına göre dinamik kalibrasyon

Bu kalibrasyon öncesinde cihazın statik olarak kuvvet kalibrasyonunun yapılmış olması gereklidir. Bu amaçla, yorulma test cihazının statik kuvvet kalibrasyonu, EN ISO 7500-1'de belirtildiği şekilde gerçekleştirilmelidir. Ölçümler, kullanılan kuvvet dönüştürücünün kapasitesinin %10'u,%100'ü toplamda en az beş noktada yapılmalıdır.

Kuvvet dönüştürücü uygun şekilde bağlanmalıdır. Statik kuvvet kalibrasyon işlemi kısaca aşağıdaki gibidir:

- Kuvvet dönüştürücü, yorulma test cihazına bağlanır ve termal dengeye gelmesi için yeterince bekletilir (çalışır şekilde 30 dakika tavsiye edilir).
- Kalibrasyon öncesi, kuvvet dönüştürücünün kapasitesinin %100'ü kadar kuvvet değerinde üç defa yükleme ve boşaltma (sıfıra dönüş) yapılmalıdır. Maksimum kuvvet değerinde en az 1 dakika boyunca beklenilmeli ve bu esnada okunan değerlerdeki değişim $\pm$ % 0,2'yi geçmemelidir.
- Kuvvet kalibrasyonunda beş ölçüm noktasından az olmamak üzere minimum değerden maksimum değere kadar bir seri ölçüm gerçekleştirilmeli ve bu esnada okunan değerler kaydedilmelidir.
- En az beş noktada ölçüm yapıldıktan sonra yük boşaltılmalı (sıfıra dönülmeli) ve okunan değer kaydedilmelidir.
- Madde c ve d'de belirtilmiş işlemler toplam üç seri olacak kadar tekrar edilmelidir.
- Elde edilen değerlerden EN ISO 7500-1 standardına uygun olarak hata parametreleri ve belirsizlik değerleri hesaplanır. Bu değerler uygun şekilde raporlanır.

Statik kuvvet kalibrasyonuna ilişkin hesaplamalar, belirsizlik kriterlerinin belirlenmesi ve genişletilmiş ölçüm belirsizliği hesabı EN ISO 7500-1 standardında belirtildiği gibi yapılmalıdır.

Dinamik Kalibrasyon

Referans kuvvet dönüştürücü makinaya rijit bir şekilde bağlanır. Belirlenen kuvvet noktalarına göre cihazın ulaşacağı kuvvet değerleri statik olarak yükleme yapıldıktan sonra referans kuvvet dönüştürücünden okunan datalar aşağıdaki tabloya yerleştirilir.

Statik yükleme ardından dinamik yükleme uygulanır. Uygulama süresi kalibrasyonu yapan kişinin tecrübesiyle karar verebileceği bir değerdir. Bu belirlemede değerlendirme için yeterli data alınıp alınmadığı ile belirlenir.

Datalar toplandıktan sonra değerlendirme işlemine geçilir. Aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi genlik hatası değeri (Af), dinamik genlik değerinden (Ad) statik genlik değerinin (As) çıkartılması ile belirlenir. Bu değer MIL-STD-1312B standardında müsaade edilen toleransı % ± 6 'dır.

$Ad = \text{maksd} - \text{mind}$

$As = \text{makss} - \text{mins}$

$Af = Ad - As$

$Af = 100 \times (Ad - As) / As, \%$

Ortalama kuvvet hatası değeri de (Mf) genlik hatasına benzer şekilde, dinamik maksimum kuvvet değerinden (maksd) statik maksimum kuvvet değerinin (makss) çıkartılarak oranlanmasından belirlenir. Bu değerinde MIL-STD-1312B standardında müsaade edilen toleransı % ± 6 'dır.

$Mf = 100 \times (\text{maksd} - \text{makss}) / \text{makss}, \%$

Bu değerlendirmeler sonucunda istenilen toleransları sağlayan cihazların bu test ölçümü için uygun olduğu beyan edilebilir.

Tablo 4.38. MIL-STD-1312B standardına göre dinamik kuvvet doğrulama değerleri örnek tablosu

		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm
Kuvvet (statik), kN		0,5	0,5	0,5	3,0
Kuvvet (dinamik), kN		3,0	5,0	8,0	2,0
Test Frekansı, Hz		0,2	0,2	0,2	0,2
Ölçülen Kuvvet (statik), mV/V	maks _s .	0,06943	0,09141	0,10831	0,21860
	min _s .	0,06857	0,09031	0,10787	0,21792
Ölçülen Kuvvet (dinamik), mV/V	maks _d .	0,06904	0,09124	0,10802	0,21799
	min _d .	0,06815	0,09009	0,10759	0,21733
Genlik, Statik, A _s =maks _s -min _s		0,00086	0,00110	0,00044	0,00068
Genlik, Dinamik, A _d =maks _d -min _d		0,00089	0,00115	0,00043	0,00066
Genlik Hatası, A _f = A _d - A _s		0,00003	0,00005	-0,00001	-0,00002
Genlik Hatası, A _f = 100x(A _d - A _s) / A _s , %		3,49	4,55	-2,27	-2,94
Genlik Hatası Toleransı, %		± 6	± 6	± 6	± 6
Maksimum Kuvvet Hatası, M _f = 100x(maks _d -maks _s) / maks _s , %		-0,56	-0,19	-0,27	-0,28
Maksimum Kuvvet Hatası Toleransı, %		± 6	± 6	± 6	± 6

MIL-STD-1312B

Static Comparison				Dynamic Comparison			
Machine Programmed Load - Lb		Dynamometer Indicated Strain Microinches		Machine Programmed Load - Lb		Dynamometer Indicated Strain Microinches	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
300	3000	18	187	300	3000	19	185

Amplitude Error:

$$\frac{(185-19) - (187-18)}{(187-18)} \times 100 = 1.77\%$$

Maximum Load Error:

$$\frac{185-187}{187} \times 100 = -1.07\%$$

Dinamik ölçüm test sonuç ve değerlendirme tablosu ve raporlama

Elde edilen ölçüm sonuçları yukarıdaki tablolardaki bilgileri içerecek şekilde ilgili çekme / basma test makinasının sertifikasında belirtilmelidir.

4.31. Malzeme Test Makinalarının Dinamik Kuvvet Kalibrasyonlarının Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Malzeme test makinalarının dinamik kuvvet kalibrasyon standartlarında belirsizlik hesaplaması için herhangi bir tanımlama yapılmamıştır. Statik kuvvet kalibrasyonu için EN ISO 7500-1 standardına yönlendirmesi nedeniyle statik kuvvet belirsizlik hesaplaması EN ISO 7500-1 standardında verildiği şekilde hesaplanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]. EN ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines.
- [2]. Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan,C., 2017, “Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı”, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2017
- [3]. EN 10002-3, 1994, Metallic materials-Tensile Test-Part 3: Calibration of force proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines
- [4]. EURAMET CG-04, Uncertainty of Force Measurements Version 2.0, 2011.
- [5]. Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C., 2015, EURAMET CG-04, Kalibrasyon Rehberi, “Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik” TÜBİTAK UME, Şubat 2015
- [6]. Dizdar, H., Vatan, C., Aydemir, B., 2015, “Bağıl Enterpolasyon Hatasının Farklı Matematiksel Yöntemlerle Hesaplanması ve Sayısal Örneklenmesi Teknik Raporu”, TÜBİTAK UME, Ocak 2015
- [7]. Dizdar, H., Vatan, C., Aydemir, B., 2016, “Kuvvet Ölçümlerinde Bağıl Enterpolasyon Hatasının Farklı Matematiksel Yöntemlerle Hesaplanması ve Sayısal Örneklenmesi”, IMSTEC 2016, October 26-28, 2016, Adana/TURKEY, p.197-205
- [8]. ISO 7500-1:2018, Metallic Materials-Verification of Static Uniaxial Testing Machines Tension/Compression Testing Machines-Verification and Calibration of the Force-Measuring Systems.
- [9]. Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan,C.,2018, “Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı”, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018
- [10]. ASTM E74-18, 2018, Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments
- [11]. ASTM E4-16, 2016, Standard Practices for Force Verification of Testing Machines
- [12]. Zumbun, H., 2018, An Introduction to the Differences Between the Two Most Recognized Force Standards, Cal Lab, The International Journal of Metrology, Jan, Feb, Mar 2018, (26-30)
- [13]. Aydemir B., Dizdar H.,Vatan C., “EN ISO 376 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi” Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, TÜBİTAK UME, S.2, N.1, 2019 (1-11)
- [14]. Dizdar H., Aydemir B., Vatan C., “ISO 7500-1 Standardına Göre Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi” Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, S.2, N.2, 2019 (12-24)
- [15]. DKD R 3-9, 2020, Continuous calibration of force transducers according to the comparison method
- [16]. DKD-R 3-9, 2018, Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren
- [17]. Dizdar, H., Aydemir, B., 2019, Piezo Elektrik Kuvvet Sensörlerinin kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı, International Marmara Sciences Congress (Autumn) 2019, S.323-329
- [18]. Aydemir, B., Ayan, E., Elmas, B.S., Dizdar, H., (2019), Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Yapısı, Avantajları ve Kalibrasyonu”, IMSEC 2019, p. 1054-1060

- [19]. DKD-R 3-10 Sheet 1, 2017, Dynamic calibration of uniaxial force measuring devices and testing machines (basic principles)
- [20]. DKD-R 3-10 Sheet 2, 2019, Dynamic calibration of force transducers according to the sinusoidal method
- [21]. DKD-R 3-10 Sheet 3, 2019, Dynamic verification of material testing machines using applied samples
- [22]. MIL-STD-1312B, 1984, Military standard, fastener test methods
- [23]. ASTM E1012, 2005, Standard Practice for Verification of Test Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application
- [24]. Dahlberg,G., 2002, Dynamic calibration of axial fatigue testing machine. Why is it important and how is it accomplished, EUROLAB International workshop investigation and verification of material testing machines
- [25]. www.zwick.com
- [26]. www.instron.com
- [27]. www.a2la.org

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen kuvvet ölçümlerinin kalitesinin göstergesi ölçüm belirsizliği değeridir. Ölçüm belirsizliklerinin doğru parametreler katılarak en düşük seviyede olacak şekilde hesaplanması arzu edilen durumdur. Bu alanda çalışan kişiler ve ilgili laboratuvarlarının belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla bu kitap hazırlanmıştır. Verilen sayısal örnek ile hesaplamadaki tüm aşamalar açıklanmıştır. Bu sayede, ilgili ölçümleri yapan veya kullanan konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir.

Bu kitapta, kuvvet ölçümlerinde ölçüm belirsizlik değerlerinin hesabı açıklanmış ve hesapta etkili parametreler verilmiştir. Kaliteli ve doğru sonuçlarına ulaşmak için ilgili standarda uygun deney yöntemi, düzenli kalibre edilmiş ekipman kullanımı belirsizlik değerini önemli ölçüde düşürecektir. Ancak deney cihazını kullanan operatörlerinde belirli bir eğitim ile belirsizlik üzerinde etki edebilecek parametrelerinin minimuma indirilmesi sağlanmalıdır.

Bu kitap, kuvvet ölçümleri alanında çalışanlar için uygulamalı olarak bir örnek ve rehber olması amacıyla hazırlanmıştır. Kullanıcılarına faydalı olmasını dilerim.

GERİ DÖNÜŞ VE KATKILAR

Bu kitap geliştirilmeye açık bir doküman olup, devamlı şekilde üzerinde çalışılacaktır. Bu anlamda dokümana katkıda bulunmak üzere eleştiri, öneri ve düzeltme isteklerinizi aşağıdaki e-posta adreslerime kitap adı ve sayfa no. belirterek yazabilirsiniz.

bulent.aydemir@tubitak.gov.tr

ISBN: 978-605-312-399-6

KUVVET KALİBRASYONLARI REHBERİ

FORCE CALIBRATIONS GUIDE

2021