

UME 94-008

GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM

Hazırlayanlar

Eyüp Bilgiç Enver Sadikhov

ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ
Fizik Grubu, Akustik ve Titreşim Laboratuvarı

Aralık 1994

Gebze-Kocaeli

FAK
GEN
011

GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM

İÇİNDEKİLER

1	TEMEL KAVRAMLAR VE TERİMLER	1.2
1.1	Akustiğin Tanımı	1.2
1.2	Sesin Tanımı, Fiziksel Özellikleri ve Yayılması	1.3
1.3	Küresel, Silindrik ve Düzlemsel Ses Dalgaları	1.8
1.4	Ses Gücü, Ses Basıncı, Ses Şiddeti	1.10
1.5	Ses Şiddeti ve Ses Gücünün Ses Basıncı Cinsinden Hesaplanması	1.13
1.6	Desibel Ölçeği, Ses Gücü ve Ses Basınç Düzeyleri	1.16
1.7	Ses Basınç Düzeyleriyle İşlemler	1.19
1.7.1	Ses Basınç Düzeylerinin Toplanması	1.19
1.7.2	Ses Basınç Düzeylerinin Çıkartılması	1.21
1.8	Sesin Yayılma Ortamındaki Engellerin Etkileri	1.23
1.9	Ses Dalgalarının Frekans Bileşenleri	1.26
1.10	Oktav ve 1/3 Oktav Bantları	1.27
1.11	Saf Ton Seslerde Ses Yüksekliği Düzeyi	1.30
1.12	Ses Ölçümlerinde Kullanılan Diğer Terimler	1.32

2	GÜRÜLTÜ ÖLÇÜMLERİNE GİRİŞ	2.3
2.1	Giriş	2.3
2.2	Ses Düzeyi Ölçerler ve Özellikleri	2.4
2.3	Çevresel Gürültü	2.8
2.4	Gürültü Ölçümlerinde Dikkat Edilecek Noktalar	2.8
2.5	Mikrofon Yüksekliği	2.11
	2.5.1 Açık Alanlarda Ölçümler	2.11
	2.5.2 Binaların Yakınında Açık Alanda Yapılan Ölçümler	2.11
	2.5.3 Bina İçinde Yapılan Ölçümler	2.12
2.6	Kaydedici Kullanılması	2.13
2.7	Frekans Analizinin Kaydedilmesi	2.13
2.8	Gürültü Haritası	2.14
2.9	Gürültü Ölçüm Raporu	2.16
2.10	Gürültü Tipleri ve Ölçülmeleri	2.17
	2.10.1 Geriplan Gürültüsü	2.18
	2.10.2 Kararlı Gürültülerin Ölçümü	2.19
	2.10.3 Kararlı Gürültü Kriteri	2.20
	2.10.4 Kesikli Değişken Gürültü Düzeyleri	2.20
	2.10.5 Gürültü Dozunun Ölçülmesi	2.23
	2.10.6 Darbe Gürültüsü Kriteri	2.23
	2.10.7 Darbe Gürültüsünün Ölçülmesi	2.24
2.11	Gürültü Değerlendirme Eğrilerinin Kullanımı	2.24
2.12	NC Eğrileri	2.25

3	EMİSYON ÖLÇÜMLERİNE GİRİŞ	3.5
3.1	Giriş	3.5
3.2	Ses Ölçüm Dönüştürücüleri	3.6
3.2.1	Dinamik Mikrofonlar	3.6
3.2.2	Şerit (Ribbon) Mikrofonlar	3.6
3.2.3	Seramik Dönüştürücüler	3.7
3.2.4	Manyetostriktif Dönüştürücüler	3.8
3.2.5	Sıcak-Tel (Hot-wire) Probları	3.8
3.2.6	Piezorezistif Elemanlar	3.9
3.2.7	Karbon Mikrofonlar	3.9
3.2.8	Kapasitif (Condenser) Mikrofonlar	3.10
3.3	Ses Gücünün Ölçümü	3.12
3.3.1	Ses Güç Ölçümlerinde Temel Yaklaşımlar	3.13
3.3.2	Ses Basınç Düzeyi ile Ses Gücü Ölçümü	3.15
3.3.2.1	Ses Güç Düzeyi Ölçümü İçin Gerekli Teçhizat	3.15
3.3.3	Test Ortamı	3.16
3.3.4	Test Odasının Boyutu	3.17
3.3.5	Test Odasının Yutuculuğu	3.17
3.3.6	İstenmeyen Yansımalar	3.18
3.3.7	Diğer Faktörler	3.18
3.3.8	Ölçüm Yüzeyi	3.19
3.3.9	Mikrofon Konumu ve Yönü	3.20
3.3.10	Techizat Konfigürasyonu ve Ayarları	3.22
3.3.11	Ölçüm Prosedürü	3.23

3.3.11.1	Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu	3.23
3.3.11.2	Geriplan Gürültüsü Ölçümü	3.24
3.3.11.3	SPL Aralığının Kontrolü	3.24
3.3.11.4	Ses Gücü Hesabında Kullanılan SPL Ölçümleri . . .	3.24
3.3.11.5	Kullanıcı Konumunda Ölçüm	3.25
3.3.11.6	Düzeltilmiş SPL ve Ses Gücünün Hesaplanması . .	3.25
3.3.11.7	Ölçüm Raporu	3.26
3.4	Ses Şiddeti Ölçerek Ses Gücünün Hesaplanması	3.27
3.4.1	Gürültülü Ortamda Gücü Ölçümü	3.28
3.4.2	Ses Şiddetinin Ölçülmesi	3.28
3.4.2.1	Bir Yöndeki Hızın Ölçülmesi	3.30
3.4.2.2	Basınç Farkının Hıza Dönüştürülmesi	3.30
3.4.3	İki Mikrofonlu Ses Şiddet Probu	3.33
3.4.4	Ölçümdeki Hata Kaynakları	3.34
3.4.4.1	Yüksek Frekans Hataları	3.34
3.4.4.2	Düşük Frekans Hatası	3.35
3.4.4.3	Artık (Residual) Şiddet	3.37
3.4.5	Ses Şiddeti Kullanarak Ses Gücünün Belirlenmesi	3.38
3.4.5.1	Uygun Frekans Bölgesinin Seçilmesi	3.38
3.4.5.2	Ses Şiddet Probu'nun Konfigürasyonu	3.39
3.4.5.3	Test Ortamı	3.42
3.4.5.4	Ölçüm Yüzeyi	3.43
3.4.5.5	Alan Kalibrasyonu	3.43
3.4.5.6	Alan Kontrolü	3.44

3.4.5.7	Yüzey Üzerinde Şiddet Ölçümü	3.44
3.4.5.8	Yüzey Ses Şiddet Düzeyinin Hesaplanması	3.45
3.4.5.9	Ses Güç Düzeyinin Hesaplanması	3.46
3.4.5.10	Test Raporu	3.47

4	SES FİZYOLOJİSİ, GÜRÜLTÜ İLE OLUŞAN İŞİTME KAYIPLARI VE KORUNMA YÖNTEMLERİ	4.3
4.1	Giriş	4.3
4.2	İnsan Kulağı ve Sesin Algılanması	4.3
4.3	İnsan Kulağının İşitme Sınırları	4.5
4.4	Çalışma Yerindeki Gürültünün İnsan Üzerinde Etkisi	4.8
4.4.1	İşitme Sistemine Etkiler	4.8
4.4.2	Fonksiyonların Engellenmesi ile İlgili Etkiler	4.12
4.4.3	Psikolojik Etkiler	4.13
4.4.4	Fizyolojik Etkiler	4.14
4.5	Gürültüden Korunma Yöntemleri	4.14
4.5.1	Teknik Koruyucu Önlemler	4.14
4.5.2	Tıbbi Koruyucu Önlemler	4.16
4.5.3	Organizasyona Ait Önlemler	4.18

5	YAPILARDA GÜRÜLTÜ SORUNU VE DENETİMİ	5.4
5.1	Giriş	5.4
5.2	Yapı Dışı gürültüleri	5.4
5.3	Yapı İçi Gürültüleri	5.5
5.4	Yapı Mimarisi - Kentsel Yerleşmeler	5.6
5.5	Gürültü Denetimi	5.7
5.6	Sesin Geçmesi	5.10
5.6.1	Sesin Cidar Titreşimi İle Geçmesi	5.10
5.6.2	Bileşik Cidar	5.12
5.6.3	Çift Cidar	5.13
5.7	Yapı Dışı Gürültülerin Denetimi	5.14
5.7.1	Dış Gürültü Ortamının Belirlenmesi	5.14
5.7.2	Yapı Kabuğuna Gelen Gürültü Düzeyini Etkileyen Etkenlerin Değerlendirilmesi	5.17
5.7.3	Gürültü Denetiminde Kabul Edilebilecek Fon Gürültü Düzeylerinin Belirlenmesi	5.18
5.7.4	Yapı Kabuğunun Gerekli Ses Geçirmezliğinin Belirlenmesi	5.19
5.7.5	Yapı Kabuğunun Ses Geçirmezliğinin Hesaplanması	5.20
5.8	İstenmeyen Akustik Olaylar İçin Ses Emici Malzemelerin Kullanımı	5.23
5.8.1	Sesin Emilmesi	5.23
5.8.2	Emiciliğe Tesir Eden Faktörler	5.24
5.8.3	Ses Yutucu Malzemelerin Sınıflandırılması	5.25
5.8.3.1	Gözenekli Malzemeler	5.26
5.8.3.2	Panel Yutucular	5.26

5.8.3.3	Boşluk ya da Helmholtz Rezonatörleri	5.27
5.8.3.4	Mekan Yutucuları	5.28
5.8.3.5	Değişken Yutucular	5.28
5.8.4	Ses Yutucu Malzemelerin Kullanım Yerleri	5.29

6	TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ	6.5
6.1	Giriş	6.5
6.2	Titreşimin Tanımı ve Genel Terimler	6.5
6.3	Piezoelektrik İvme Ölçerler	6.9
6.3.1	Titreşim Ölçümlerinde Kullanılan Dönüştürücüler	6.9
6.3.1.1	Yakınlık Probu	6.10
6.3.1.2	Kapasitif Prob	6.10
6.3.1.3	Konum Potansiyometresi	6.11
6.3.1.4	Piezorezistif Çevirici	6.11
6.3.1.5	Hareketli Bobin	6.11
6.3.2	İvme Ölçerin Çalışma Prensibi	6.11
6.3.2.1	İvme Ölçerin Analitik Davranışı	6.12
6.3.3	Frekans Bölgesi	6.17
6.3.3.1	Üst Frekans Limiti	6.18
6.3.3.2	Alt Frekans limiti	6.19
6.3.4	İvme Ölçerlerin Pratik Dizaynları	6.19
6.3.4.1	Delta Kayma Dizaynı	6.20
6.3.4.2	Düzlem Kayma	6.21
6.3.4.3	Merkez Monteli Sıkıştırma Dizaynı	6.21
6.3.4.4	Hat Sürücülü İvme Ölçerler	6.22
6.3.5	Piezoelektrik Malzemeler	6.23
6.3.6	İvme Ölçerlerin Hassasiyeti	6.25
6.3.6.1	Yük ve Voltaj Hassasiyeti	6.26
6.3.6.2	Birim Kazanç Hassasiyeti	6.27

6.3.6.3	Lineerlik ve Dinamik Bölge	6.28
6.3.6.4	Enine Hassasiyet	6.29
6.3.7	Pratikte İvme Ölçerlerin Performansı	6.32
6.3.7.1	Çevresel Etkiler	6.33
6.3.7.2	Sıcaklık Aralığı	6.33
6.3.7.3	Kısa Süren Sıcaklık Dalgalanması	6.35
6.3.7.4	Akustik Duyarlılık	6.37
6.3.7.5	Kaide Gerilmeleri	6.37
6.3.7.6	Nem Etkisi	6.38
6.3.7.7	Manyetik Duyarlılık	6.38
6.3.7.8	Radyasyon Etkisi	6.38
6.4	Titreşim Önyükselteçleri	6.38
6.4.1	Önyükselteç Dizaynı ve Çalışma Prensibi	6.39
6.4.2	Yük Önyükselteçleri	6.39
6.4.3	Voltaj Önyükselteçleri	6.40
6.5	Titreşim Ölçümleri	6.40
6.5.1	Titreşimle İlgili Standardlar	6.41
6.5.2	Titreşim Seviyesini Belirlemek İçin Parametre Seçimi	6.43
6.5.3	İvme Ölçer Monte Konumunun Seçilmesi	6.44
6.5.4	Titreşim Ölçüm Cihazları	6.46
6.5.4.1	Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu	6.47
6.5.5	Titreşim Frekans Analizi	6.49
6.5.5.1	Frekans Analiz Metodunun Seçimi	6.49
6.5.6	Titreşim Ölçümlerinin Kullanım Alanları	6.51

7	MEKANİK TİTREŞİMLERİN İNSAN ÜZERİNE ETKİSİ	7.3
7.1	Giriş	7.3
7.2	İnsan Vücudunu Etkileyen Titreşimler	7.3
7.3	İnsan Vücudunun Çeşitli Frekanslardaki Titreşimlere Karşı Tepkisi	7.4
7.4	Frekans Ağırlığı	7.6
7.5	Ağırlık Eğrileri ve Referans Eksenler	7.7
7.6	İstatistik Analiz	7.8
7.7	İnsan Vücudunun Titreşime Maruz Kalmasının Değerlendirilmesi	7.9
7.8	İnsan Vücudunu Etkileyen Titreşimlerin Kontrolü	7.10
8	KAYNAKLAR	8.1

1

TEMEL KAVRAMLAR VE TERİMLER

1	TEMEL KAVRAMLAR VE TERİMLER	1.2
1.1	Akustiğin Tanımı	1.2
1.2	Sesin Tanımı, Fiziksel Özellikleri ve Yayılması	1.3
1.3	Küresel, Silindrik ve Düzlemsel Ses Dalgaları	1.8
1.4	Ses Gücü, Ses Basıncı, Ses Şiddeti	1.10
1.5	Ses Şiddeti ve Ses Gücünün Ses Basıncı Cinsinden Hesaplanması	1.13
1.6	Desibel Ölçeği, Ses Gücü ve Ses Basınç Düzeyleri	1.16
1.7	Ses Basınç Düzeyleriyle İşlemler	1.19
1.7.1	Ses Basınç Düzeylerinin Toplanması	1.19
1.7.2	Ses Basınç Düzeylerinin Çıkartılması	1.21
1.8	Sesin Yayılma Ortamındaki Engellerin Etkileri	1.23
1.9	Ses Dalgalarının Frekans Bileşenleri	1.26
1.10	Oktav ve 1/3 Oktav Bantları	1.27
1.11	Saf Ton Seslerde Ses Yüksekliği Düzeyi	1.30
1.12	Ses Ölçümlerinde Kullanılan Diğer Terimler	1.32

Akustik, ses dalgalarının oluşumu, iletimi, etkileri ve işitme ile ilgili konuları inceleyen ve uygulama olanaklarını araştıran bir bilimdir. Kısaca ses-bilim ve tekniği olarak tanımlanabilir. Başlangıçta bu bilim, ses veren aletlere ve müzik aletlerine karşı duyulan ilgiden doğmuştur. Akustik sözcüğü Yunanca "akoustiki" (eski Yun. akoustekhne, akoustikos) deyiminden gelir. Bu deyim anlam bakımından işitme kavramı ile ilgilidir. Akustiğin kökeni, fizikçi Aristoteles ile milattan önceki devirlere değin uzanmaktadır. Sonraları, Phytagoras, Bacon, Galileo, Newton, Edison, Bell, Hertz, Sabiri ve diğerleri, ses titreşimlerinin kuramsal ve deneysel yönlerden inceleyerek fiziksel akustiğin temellerini kurmuş ve uygulama alanını genişletmişlerdir.

Yüzyılın son yarısında Akustik ilgi duyulan yeni çevre bilimlerinden biri olmuş ve tıp, biyoloji, fizyoloji, çeşitli mühendislik dalları, mimarlık ve şehircilik gibi bilim ve disiplinler ile bütünleşerek bu çeşit bilimler arası nitelik kazanmıştır. Özellikle ses enerjisinin elektriksel enerjiye, elektriksel enerjinin ses enerjisine dönüştürülmesi, sesin yazılması, okunması ve tekrarlanması, telefonda sonra radyonun, gramofonun, sesli filmin vs. bulunması, akustiğin optik, elektrik ve elektronik tekniği ile birleşerek büyük ilerlemeler yapacağı ve uygulama alanının çok genişleceğini ortaya çıkartmıştır.

Uluslararası Akustik Komisyonu (ICA) akustik konularını şu başlıklar altında toplamaktadır [1]:

1. Konuşma İletişimi
2. Fizyolojik ve Psikolojik Akustik
3. Gürültü, Etkileri ve Kontrolü
4. Şok ve Vibrasyon

5. Mimari Akustik ve Yapı Akustiği
6. Bioakustik
7. Sualtı Akustiği
8. Ses Üstü (ultrasonik), Kuantum Akustiği ve Sesin Fiziksel Etkileri
9. Fiziksel Akustik
10. Aeroakustik (atmosferik akustik)
11. Müzik Akustiği ve Müzik Aletleri
12. Ses İletimi (ses yayını ve yeniden üretimi)
13. Akustik Ölçümler ve Araçlar (sinyal işleme)

1.2 Sesin Tanımı, Fiziksel Özellikleri ve Yayılması

Ses, bir kaynak tarafından ortam basıncında dalgalanma oluşturan ve insanda işitme duygusunu uyaran fiziksel bir olay olarak tanımlanmaktadır. İstenmeyen ve dinleyeni rahatsız edici seslere ise **gürültü** denir. Herhangi bir sesin dinleyeni rahatsız etmesi sadece sesin kalitesine bağılı olmayıp aynı zamanda bizim ona karşı olan davranışımıza da bağılıdır. Örneğın, kalkış yapan bir jet uçağının sesi dizayn mühendisine müzik gibi gelebilir, fakat koşu yolunun yakınında yaşayan insanlar için bu ses ıstırap verici olabilir. Ses rahatsız edecek kadar gürültü olmak zorunda değıl. Gıcırdayan bir zemin, plak üzerinde bir çizik ya da su damlatan bir musluk gök gürültüsü kadar rahatsız edici olabilir.

Verdiğimiz tanımlardan hemen anlaşıldığı gibi ses ve gürültü ile ilgili çalışmaların alanı cansız doğaya ilişkin bilimlerle canlı doğaya ilişkin bilimlerin ara kesitinde yer almaktadır. Bir yanda basınç, hız gibi nesnel ve ölçülebilir kavramlarıyla cansız doğa ve deterministik fizik yasaları, öbür yanda ise işitebilirlik, rahatsız edicilik gibi öznel ve ölçülmez kavramlarıyla canlı doğa ve istatistiksel psiko-fizyoloji yasaları söz konusudur.

Sesin oluşması bir elastik ortamın varlığı ile ilgilidir. Örneğin, vakumda ya da boşlukta sesin yayılması olanaksızdır. Ses, bir ortamdaki parçacıkların bir nedenle titreşmesiyle ortaya çıkar ve ortamda komşu parçacıkların titreşim hareketini birbirine iletmesiyle, ilerleyen dalgalar halinde yayılır. Bu dalgalar ortamın ulaştıkları noktalarında basınç değişmelerine yol açarlar. Bu yüzden ses ile ilgili olaylarda gaz, sıvı ve katı cisimlerin 20-20000 Hz arasındaki mekanik titreşimleri göz önüne alınmaktadır. Sesleri frekansına göre şöyle bir ayırma yapmak olanağı vardır.

Çizelge 1.1 Seslerin frekanslarına göre dağılımı.

SESLER	FREKANS BÖLGESİ	DALGA BOYU
Kalın sesler	16-160 Hz	20 m - 2m
Orta sesler	160-1600 Hz	2 m - 0.2 m
İnce sesler	1600-20000 Hz	0.2 m - 0.02 m

Ses dalgalarının değişik ortamlardaki ilerleme hızı, ya da kısaca ses hızı c , ortamın fiziksel özelliklerine bağlı bir sabittir ve

$$c = k \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.1)$$

k	:	Bir sabit
E	:	Ortamın elastiklik modülü (N/m^2)
ρ	:	Ortamın yoğunluğu (kg/m^3)

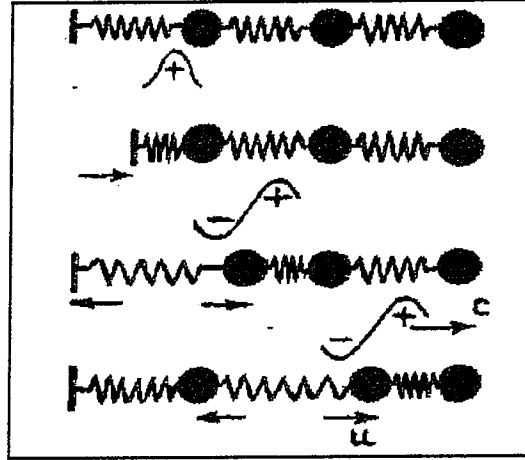
şeklinde hesaplanır. E ve ρ basınç ve sıcaklığın fonksiyonu olduğundan, ortamlardaki ses hızı da sıcaklık ve basınçla değişir. Bazı ortamların 1013 mbar ve 20 °C' deki ses hızları Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Sesin ortamda yayılması sırasında ilerleyen, ortamın parçacıkları değil, basınç dalgasıdır. Dolayısıyla bu olayda kütle iletimi değil, enerji iletimi söz konusudur. Ortam parçacıklarının sesin yayılması sırasındaki hareketi belli bir denge konumu civarındaki bir titreşim hareketinden ibarettir. Ses hızı c'nin dalga ilerleme hızı olduğuna ve bunun ortam parçacıklarının titreşim hızından farklı bir büyüklük olduğuna dikkat edilmelidir.

Çizelge 1.2 Çeşitli ortamlarda 20°C'de ses hızları

ORTAM	YAYILMA HIZI (m/s)
Hava	344
Mantar	500
Kurşun	1200
Su	1400
Sert kauçuk	1400-2400
Beton	3000-3400
Tahta	3300-4300
Dökme demir	3700
Çelik-Alüminyum	5100
Cam	5200

Ses dalgalarının oluşumu ve ortamda iletilmesi çok basitleştirilmiş olarak Şekil 1.1'deki model yardımıyla kavranabilir.



Şekil 1.1 Ses dalgasının basit modeli

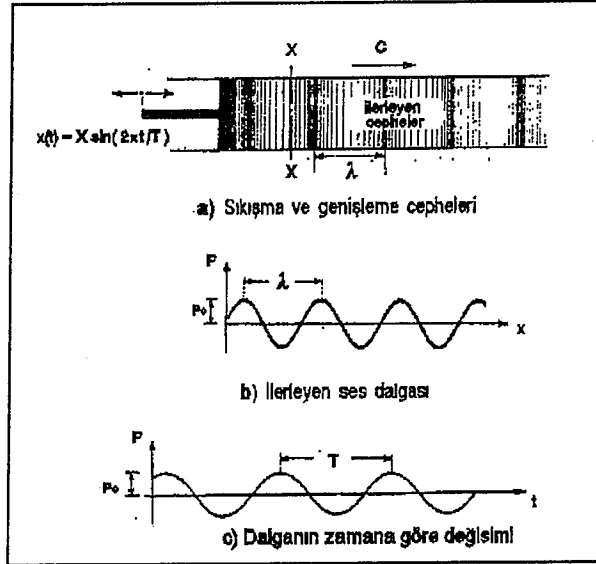
Sesin bir ortamda yayılabilmesi için ortamın sahip olması gereken iki temel özelliği olan kütle ve esneklik özelliklerine sahip bu model, bir dış etkinin ortamda ilerleyen basınç dalgaları doğurduğunu, bu dalgaların ilerlemesi sırasında ortam parçacıklarının titreşmesini ve dalganın ilerleme hızı c ile parçacık hızı u 'nun farklı niteliklerini basitçe sergilemektedir.

Sesle ilgili bazı temel kavramları görebilmek için Şekil 1.2'de gösterilen bir ucu açık, silindirik bir boru içerisinde sinüsoidal titreşim hareketi yapan bir pistonun sese yol açışını göz önüne alalım [2].

Piston, hareketinin sağa yönelik evresinde ortamda sıkışmaya, sola yönelik evresinde ise genişlemeye neden olur. Esasen pistonun her konumunda ortamda farklı basınç cephesi oluşur ve bu cephelerin her biri ortamda ses hızıyla ilerler. Belli bir t anında, basıncın boru boyunca değişimine bakılırsa, Şekil 1.2a'daki görünüm elde edilir. Basınç ortam basıncı civarında

$$p(x) = p_o \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (1.2)$$

şeklinde, sinüsoidal bir değişim göstermekte ve Şekil 1.2a'daki dalga bir bütün halinde c hızıyla sağa doğru ilerlemektedir.



Şekil 1.2 Titreşim yapan bir pistonun boru içinde yarattığı ses dalgaları

Öte yandan borunun belli bir X kesitindeki basıncın zamanla değişimine bakılacak olursa Şekil 1.2c'deki görünüm elde edilir. Bu değişim

$$p(t) = p_0 \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (1.3)$$

şeklinde ortam basıncı civarında sinüsoidal bir değişimdir. Bu değişimin T periyodu, sese yol açan piston hareketinin periyodundan başka bir şey değildir. Olayı karakterize eden büyüklükler şunlardır :

- p_0 : Ses basıncının genliği ($N/m^2 = Pa$)
- T : Basınç değişiminin periyodu (s)
- λ : Sesin dalga boyu (m)
- c : Ortamdaki ses hızı (m/s)
- f : Sesin frekansı ($1/s = Hz$)

Bu büyüklüklerin neleri temsil ettiği şekillerden, (1.2) ve (1.3) bağıntılarından hemen anlaşılmaktadır.

Sesin Genliği: Basınç dalgalanmalarının büyüklüğünü ifade etmek için kullanılır. Dalga genliği basınç birimi olan Paskal ($\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$) cinsinden ifade edilir. Ses dalgalarının genlikleri, 1013 mbar dolayında bulunan atmosferik basıncın değerine oranla çok küçüktür.

Peryod: Ses dalgasının kendisini yinelemesi için geçen süreye denir. Şekil 1.2b'de gösterilen basit harmonik ses dalgasının periyodunun peşpeşe iki tepe noktasına ulaşılması için geçen süre olduğu anlaşılır. Peryod genellikle saniye (s) cinsinden ifade edilir. Dalganın bir periyodluk süre içinde kalan kısmına dalganın deviri denir.

Frekans: Ses dalgasının birim zamandaki yineleme sayısına denir, ve

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

şeklinde hesaplanır. Frekans Hertz (Hz) cinsinden ifade edilir.

Öte yandan Şekil 1.2c'den c hızına sahip ses dalgasının λ yolunu T süresinde aldığı anlaşıldığından

$$\lambda = c T = \frac{c}{f} \quad (1.5)$$

yazılabilir. Buradan dalga boyunun, frekans ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Burada tanımlanan karakteristikler sinüsoidal ses dalgalarıyla ilgili olup bütün ses dalgaları bu formda olmak mecburiyetinde değildir.

1.3

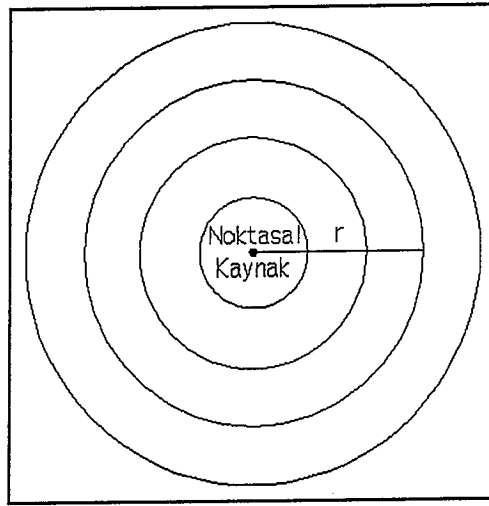
Küresel, Silindirik ve Düzlemsel Ses Dalgaları

Sesle ilgili incelemelerde ve özellikle ölçümlerde ses dalgalarının geometrisi büyük önem taşır. Kendilerini doğuran ses kaynağına bağlı olarak üç farklı geometride ses dalgası olabilir:

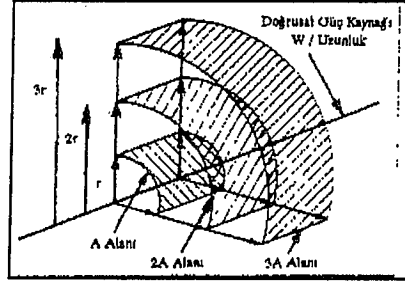
Küresel Ses Dalgaları: Noktasal bir ses kaynağının, yani titreşim yapan bir noktanın yol açtığı ses dalgaları, küresel ses dalgası diye adlandırılır.

Bu kuramsal tanıma uyan gerçek bir ses kaynağı bulmak olanaksız ise de, uygulamada, boyutları yaydığı sesin dalga boyundan küçük olan ses kaynakları, yine boyutları yaydığı sesin algılandığı noktadan uzaklığına oranla küçük olan ses kaynakları noktasal; bunların yaydığı ses dalgaları da küresel kabul edilmektedir. Böylece yerine göre bir makinanın, bir taşıtın, hatta bütün sanayi tesisinin noktasal ses kaynağı sayılması mümkün olabilmektedir.

Silindirik Ses Dalgaları: Doğrusal bir ses kaynağından yayılan ses dalgaları ortamda silindirik cepheler şeklinde yayılır ve silindirik ses dalgaları diye adlandırılır.



Şekil 1.3 Küresel ses dalgaları



Şekil 1.4 Silindirik Ses Dalgaları

Uygulamada, içinde türbülanslı akış bulunan ve ses yayan borular, sanayi tesislerinde birbirine çok yakın dizilmiş makinaların oluşturduğu hatlar, taşıyıcı bantlar (konveyör) ve çevre gürültüsünün iki önemli kaynağı olan kara ve demir yolları, kendilerinden çok uzak ya da çok yakın olmayan algılayıcılar için doğrusal ses kaynağı; bunların yaydığı ses dalgaları da silindirik ses dalgaları kabul edilebilmektedir.

Düzlemsel Ses Dalgaları: Düzlemsel bir ses kaynağından yayılan ve bu düzleme dik eksene sahip, sabit kesitli bir kanal boyunca yayılmak zorunda bırakılan ses dalgaları düzlemsel cepheler şeklinde yayılır ve düzlemsel ses dalgaları diye adlandırılırlar. Düzlemsel ses dalgalarına uygulamada çok ender rastlanmaktadır.

1.4 Ses Gücü, Ses Basıncı, Ses Şiddeti

Çeşitli ses kaynaklarını ve bunların yaydığı sesleri birbiriyle nicel olarak karşılaştırmak için bunlara ait ölçülebilir bir takım büyüklükler tanımlanması gerekir. Bu amaçla ses gücü, ses basıncı ve ses şiddeti tanımlanmıştır.

Ses gücü : Ses kaynağını karakterize eden bir büyüklüktür. Kaynağın birim zamanda ortama yaydığı akustik enerji olarak tanımlanır. Ses gücü W (Watt) cinsinden ifade edilir.

Ses basıncı : Sesi karakterize eden bir büyüklüktür. Ortamın bir noktasındaki ses basıncı, o noktadaki ani basıncın ortam statik basıncından farkı olarak tanımlanır ve $p(t)$ ile gösterilir. Aynı ses dalgasının yayılması sırasında değeri her an değişen ve bu yüzden söz konusu ses dalgasını temsil yeteneği olmayan bu ani değer yerine uygulamada, ani değerlerin anlamlı bir T süresindeki karesel ortalamaları şeklinde hesaplanan ve p_{rms} ya da yalnızca p ile gösterilen etkin ses basıncı (rms) kullanılır :

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1.6)$$

Ses basıncı denildiğinde, aksi belirtilmedikçe bu büyüklük anlaşılmalıdır.

Peryodik ses dalgalarında ortalamanın hesaplanacağı T süresi olarak dalganın periyodu alınır. Özel olarak harmonik (ya da sinüsoidal) bir ses dalgası halinde $p = \sqrt{2}/2 p_0$ olacağı (1.3) ve (1.6) bağıntılarından hemen hesaplanabilir.

Ses Şiddeti: Ses şiddeti, bir ortamın belli bir noktasından geçen net akustik enerji akımının miktar ve doğrultusunu karakterize eder. Ortamdan birim alandan birim zamanda geçen akustik enerji şeklinde tanımlanır. Birer skaler büyüklük olan ses gücü ve ses basıncından farklı olarak ses şiddeti vektörel bir büyüklüktür.

Basit bir kaynağı saran ve m^2 cinsinden ölçülen küresel yüzey S için şiddet, yüzey üzerindeki her noktada aynıdır. Böylece toplam güç (W), şiddet ($Watt/m^2$) ile yüzeyin toplam alanı (S) çarpımına eşittir. Dönüştürücülerin çoğu ilerleyen akustik dalga ile ilgili olan ses basıncını ölçerler. Bu ses basıncı doğru orantılı olarak ses şiddeti ve ses - enerji yoğunluğu ile ilişkilidir. Serbest ilerleyen düzlem ve küresel dalgalar için ses basıncı ve şiddet arasında tek ve basit bir ilişki vardır.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1.7)$$

Burada ortalama-kare ses basıncı (p^2), akustik dalgadaki ani ses basıncının zamana göre ortalamasıdır. p ise Pa cinsinden ölçülen ses basıncının etkin değeridir. ρ havanın yoğunluğu (kg/m^3) ve c sesin havadaki hızıdır (m/s). Uzak alanda ses şiddeti, ses gücü veya ses - enerji yoğunluğu p^2 ile orantılıdır.

Kendisi hareket halinde olmayan ortamlarda belli bir noktadaki ses şiddetinin bu noktadaki ses basıncı ile parçacık hızı çarpımının zaman ortalaması şeklinde hesaplanabileceği gösterilebilir :

$$I = \overline{p(t) u(t)} \quad (1.8)$$

Buna göre akım şiddetinin seçilmiş bir r doğrultusundaki bileşeni, ilgili konumdaki parçacık hızının bu doğrultudaki bileşeni $u_r(t)$ olmak üzere

$$I_r(t) = \overline{p(t) u_r(t)}$$

skaler büyüklüğünden ibaret olacaktır. Bu bağıntıyla elektrikteki

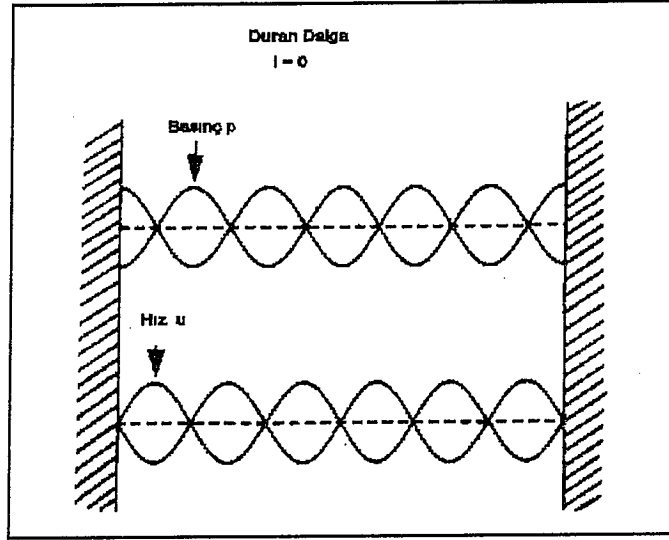
$$\text{Güc} = \text{Gerilim} \times \text{Akım}$$

bağıntısı arasında bir benzerlik mevcuttur.

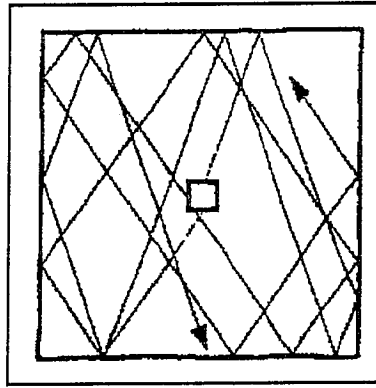
Ses şiddeti kavramının önemli bir özelliği, yayılmayan ses alanları arasına getirdiği ayrımdır. Yalnız yayılan alanlarda ses şiddeti sıfırdan farklı bir değere sahip olabilir.

Bir ses dalgasının belli açıklıktaki iki sert yüzey arasında sürekli kendi üzerine

yansımasıyla ortaya çıkan ve $p(t)$ ile $u(t)$ arasında 90° faz farkı bulunan duran dalgalar (Şekil 1.5) ve tanım olarak her noktasında her doğrultudaki enerji akışı olan ideal dağınık alanlar (Şekil 1.6) tipik yayılmayan ses alanı örnekleridir. Bunların her ikisinde de ses şiddeti her noktada sıfır olur.



Şekil 1.5 Duran dalga



Şekil 1.6 Dağınık alan

1.5 Ses Şiddeti ve Ses Gücünün Ses Basıncı Cinsinden Hesaplanması

Bir ses dalgasında parçacık hızı $u(t)$ 'nin doğrudan ölçülmesi son derece güçtür. Bu

durum $u(t)$ cinsinden tanımlanan ses şiddetinin ölçülmesini de güçleştirir. Ne var ki engelsiz bir ortamda yayılan düzlemsel ses dalgaları halinde tam olarak; diğer ses dalgaları halinde de ses kaynağından yeterince uzakta yaklaşık olarak geçerli olan

$$u(t) = \frac{p(t)}{\rho c} \quad (1.9)$$

bağıntısı parçacık hızının ani ses basıncı ve ortam sabitleri cinsinden hesaplanmasına olanak verir. Yukarıda anılan benzeşimin bir devamı olmak üzere bu bağıntıyla da elektrikdeki Ohm yasasının

$$Akım = \frac{Gerilim}{Direnç}$$

şeklindeki ifadesi arasında bir benzeşim mevcuttur. Elektrikdeki direncin akustik karşılığı olan

$$Z = \rho c \quad (1.10)$$

büyüklüğü ortamın akustik empedansı adını alır. Bazı malzemelerin akustik empedansları Çizelge 1.3'de verilmiştir.

Çizelge 1.3 Çeşitli malzemelerin akustik empedansları

MALZEME	AKUSTİK EMPEDANS ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Çelik	47.0×10^6
Su	1.48×10^6
Hava	0.000407×10^6

Yukarıda gösterilen (1.9) bağıntısı kullanıldığında ses şiddeti

$$I = \overline{p(t) u(t)} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1.11)$$

şeklinde ifade edilebilir ve ses şiddetinin dolaylı olarak ses basıncının etkin değeri yardımıyla hesaplanması, ve dolayısıyla ölçülmesi olanağı doğar.

Öte yandan noktasal kaynağın, kaynaktan r kadar uzakdaki bir noktadaki ses şiddeti, kaynağın gücü ve r yarıçaplı küre yüzeyinin alanı yardımıyla

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1.12)$$

şeklinde hesaplanabilir.

W : Noktasal kaynağın Gücü (Watt)

Benzer şekilde doğrusal kaynağın silindirik ses dalgası halinde yayılan ve kaynaktan r kadar uzaklıktaki ses şiddeti

$$I = \frac{W_l}{2\pi r} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1.13)$$

şeklinde hesaplanır.

W_l : Doğrusal kaynağın birim boyunun gücü (Watt/m)

Düzlemsel kaynak durumunda ise ses şiddeti, kaynağa olan uzaklıktan bağımsız olarak

$$I = W_s = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1.14)$$

şeklinde hesaplanabilir.

W_s : Düzlemsel kaynağın birim alanının gücü (Watt/m²)

(1.12)-(1.14) bağıntıları ses şiddeti gibi ses gücünün de ses basıncının etkin değeri cinsinden hesaplanabileceğini, dolayısıyla ses basınç düzeyi aracılığıyla ölçülebileceğini göstermektedir. Bu özelliği ses basıncını, ses ve gürültü ölçümlerinde en önemli parametre haline getirir.

1.6 Desibel Ölçeği, Ses Gücü ve Ses Basınç Düzeyleri

İnsan kulağı bir toplu iğnenin düşmesinden gök gürültüsüne kadar uzanan çok geniş bir yelpazedeki sesleri algılayabilmektedir. Bu, 10⁶ ya 1 lik bir basınç oranı aralığında ve 10¹² ye 1 lik bir ses gücü oranı aralığına karşılık gelmektedir. Eğer kulak, uyarımla orantılı duyumsama özelliğine sahip olsaydı gök gürültüsünden hasara uğramadan toplu iğneyi duyması mümkün olmazdı. İnsan kulağı, sesleri lineer bir ölçekle değil logaritmik bir ölçekle algılamaktadır. Bu nedenle akustik büyüklüklerin ölçülmesinde de logaritmik bir ölçek olan desibel ölçeği kullanılır. Bu tercih, lineer ölçek kullanılması halinde karşı karşıya kalınan çok büyük rakamlarla uğraşma gereğini de ortadan kaldırmaktadır.

Desibel Ölçeği: Aleksander Graham Bell'in adına atfen bel adı verilen bu ölçekte büyüklükler, bir referans büyüklüğüne oranlarının 10 tabanlı logaritmasıyla tanımlanırlar. 1 bel, referansın 10 katı gibi yüksek bir düzeye karşılık geldiğinden genellikle

$$L_A(dB) = 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (1.15)$$

A : Düzeyi ölçülen büyüklük

A_0 : Referans düzeyi

şeklinde tanımlanan desibel ölçeği kullanılır. Bu ölçek kullanılırken A_0 referans düzeyinin mutlaka tanımlanmış olması gerekir.

Ses Gücü Düzeyi: Bir ses kaynağı akustik dalgalar şeklinde enerji yayar. Basit bir ses kaynağı tüm doğrultularda aynı düzende yayan kaynaktır. İçerilen güç, yayılan enerjinin zamana göre oranıdır. Akustik güç W (Watt) olarak gösterilir.

Bir ses kaynağının ses güç düzeyi

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (1.16)$$

şeklinde tanımlanır. Referans güç düzeyi olarak

$$W_0 = 10^{-12} \text{ Watt}$$

kullanılır.

Kaynağı saran ortamda hiç kayıp olmadığı ve gücün küresel olarak dağıldığı kabul edilirse kaynağı , enerji seviyesi, kaynaktan uzaklaştıkça azalacaktır. Çünkü toplam güç büyükçe bir küresel yüzeyi doldurması gerekecektir. Bazı ses ve gürültü kaynaklarının ses güçleri ve ses gücü düzeyleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Ses Basıncı Düzeyi: Ses şiddeti ve ses gücü; ses basıncının karesiyle orantılı olduklarından, ses ve gürültü ölçüm ve hesaplarında ses basıncının karesi, kendisinden daha anlamlı bir büyüklüktür. Bu bakımdan ses basınç düzeyi

$$L_P = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1.17)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Ses basıncında referans düzeyi olarak insan kulağının işitme eşiği olan $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ kabul edilmiştir.

Çizelge 1.4 Bazı ses ve gürültü kaynaklarının ses güçleri ve ses gücü düzeyleri

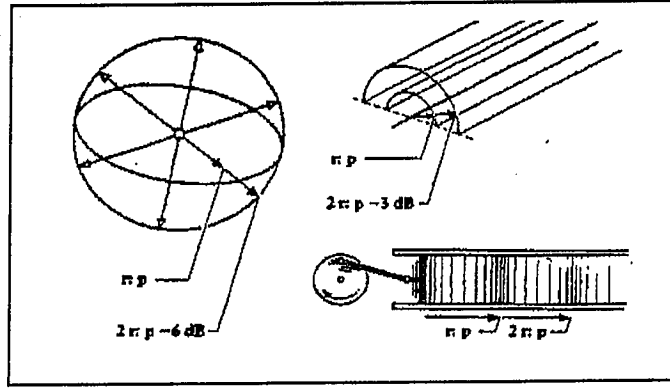
KAYNAK	SES GÜCÜ (W)	SES GÜÇ DÜZEYİ (dB, re 10^{-12} W)
Fısıltı	10^{-9}	30
Normal konuşma	10^{-5}	70
Bağırarak konuşma	10^{-3}	90
Kamyon kornası	10^{-1}	110
Pervaneli uçak motoru	1	120
Senfoni orkestrası	10	130
Dört pervaneli uçak	100	140
Dört jet motorlu uçak	5×10^4	167
Satürn roketi	5×10^7	197

(1.12)-(1.14) bağıntıları, kaynaktan uzaklığın iki katına çıkması halinde; kaynak noktasal ses kaynağı ise, ses basıncının karesinin 1/4' ine; doğrusal ses kaynağı halinde 1/2' ine düşeceğini, düzlemsel kaynak halinde ise bu büyüklüğün sabit kalacağını göstermektedir. Bunlara karşılık gelen ses basıncı düzeyindeki düşüşler hesaplandığında kaynaktan uzaklığın iki katına çıkmasının ses basıncı düzeyinde :

- a) Noktasal kaynakta 6 dB
- b) Doğrusal Kaynakta 3 dB
- c) Düzlemsel kaynakta 0 dB

lik azalmaya yol açacağı anlaşılır.

Şekil 1.7'de verilen uzaklık-ses basınç düzeyi arasındaki ilişkiler, ölçümler sırasında bir kaynağın noktasal, doğrusal, ya da düzlemsel kabul edilip edilemeyeceğinin test edilmesinde kıstas olarak kullanılabilir.



Şekil 1.7 Kaynaktan olan uzaklık-ses basınç düzeyi ilişkileri

1.7 Ses Basınç Düzeyleriyle İşlemler

Ses basınç düzeyi ile ilgili hesaplarda sık sık, değerleri dB ölçeğinde verilmiş ses basınçlarının toplanması ya da çıkartılması gerekir. Bu işlemlerin, dB ölçeğindeki değerlerin birbirine eklenmesi ya da çıkartılmasıyla yapılamayacağı açıktır. Yapılması gereken, önce ses basınç düzeyinin (1.17) tanımından yararlanarak her bir büyüklüğün mutlak değerlerinin hesaplanması, işlemin bu mutlak değerlerle gerçekleştirilmesinden sonra yeniden sonucun dB düzeyinin belirlenmesidir. Bu can sıkıcı işlemlerden kaçınmak amacıyla ses basıncı düzeylerinin toplanması ve çıkartılmasında, verilmiş grafiklerden yararlanır. Hesapların böyle grafikler yardımıyla yapılmasının getireceği hassasiyet kaybının, insan kulağı 3 dB den küçük değişimlere karşı pek duyarlı olmadığından bir önemi yoktur (Mevcut basınç düzeyi yükseldikçe farkedilebilir değişiklik düzeyi düşerek $\approx 0,5$ dB'e kadar inmektedir.).

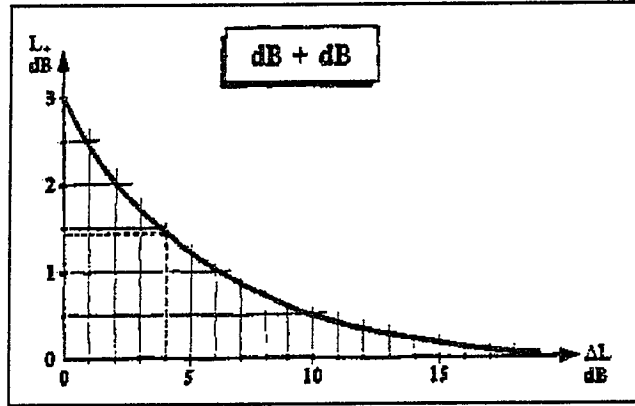
1.7.1 Ses Basınç Düzeylerinin Toplanması

İki veya daha fazla makinaların ses düzeyleri ayrı ayrı ölçülmüş ise ve bu makinaların aynı anda çalıştıkları zamandaki gürültü düzeylerini bilmek istenirse bu makinaların

ses basınç düzeylerinin toplanması gereklidir. Ancak dB değerleri logaritmik skaladan dolayı doğrudan toplanmazlar. dB değerlerinin toplanması aşağıdaki grafik ve prosedür kullanılarak yapılır.

- Herbir makinanın ürettiği ses basınç düzeyleri ölçülür (L_1 , L_2).
- İki değer arasındaki fark bulunur ($L_2 - L_1$).
- Aradaki fark (ΔL) grafiğin yatay ekseninden bulunur, eğriyi kesene kadar yukarı gidilir, bu noktadan sol tarafa doğru gidilir.
- Düşey eksende L_+ olarak bulunan değeri gürültülü makinanın gürültü düzeyine (L_2) ilave edilir ($L_2 + L_+$) . Böylelikle, iki makinanın toplam ses basınç düzeyleri bulunmuş olur.

Ses basınç düzeylerinin toplanması, Şekil 1.8'de verilen grafikten yararlanılarak yapılır.



Şekil 1.8 Ses Basınç düzeylerinin toplanması

Örnek olarak, ayrı ayrı çalıştırıldıklarında belli bir noktada yarattıkları ses basıncı düzeyleri $L_1=55$ dB ve $L_2=51$ dB olarak bilinen iki makinanın birlikte çalıştırılması halinde aynı noktada oluşacak ses basıncının hesaplanması istensin. Bu işlem, grafik yardımıyla şöyle gerçekleştirilir:

- 1) İki dB düzeyi arasındaki dB farkı hesaplanır: $\Delta L=55$ dB- 51 dB= 4 dB,
- 2) Eğriden ΔL 'ye karşılık gelen L_+ okunur: $L_+=1,4$ dB,

3) Okunan L_+ , L_1 ile L_2 'nin büyük olanına eklenerek toplam ses basınç düzeyi

$$L_t \text{ hesaplanır: } L_t = L_1 + L_+ = 55 \text{ dB} + 1,4 \text{ dB} = 56,4 \text{ dB}$$

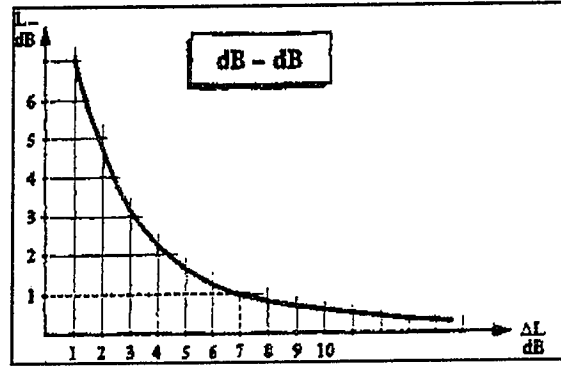
Aynı işlem analitik olarak yapıldığında $L_t = 56,45 \text{ dB}$ bulunur. Grafik yardımıyla yapılan hesabın hassasiyetinin yeterli olduğu açıktır. Birbirine eşit iki ses basınç düzeyinin toplanması, grafikten de $\Delta L = 0$ için hemen görüleceği gibi ses basınç düzeyinde 3 dB'lik bir artışa karşılık gelir.

1.7.2 Ses Basınç Düzeylerinin Çıkartılması

Geriplan gürültüsünün etkisi altındaki bir makinanın ürettiği ses basınç düzeyi ölçümleri için kullanılan prosedür aşağıdaki gibidir:

- Makina çalışırken toplam gürültü seviyesi (L_{S+N}) ölçülür.
- Makina çalışmadığı zaman geriplan gürültü seviyesi (L_N) ölçülür.
- İki ölçüm arasındaki fark bulunur ($L_{S+N} - L_N$). Eğer bu fark 3 dB'den küçük ise geriplan gürültü seviyesi, doğru ölçüm yapmak için çok yüksektir. Eğer bu fark 3-10 dB arasında ise düzeltme yapmak gerekecektir. Eğer fark 10 dB'den büyük ise ölçülen değer üzerinde herhangi düzeltme yapmaya gerek yoktur.
- Düzeltme yapmak için aşağıdaki grafik kullanılır. İki seviye arasındaki fark yatay eksenden bulunur, yatay eksenden eğriyi kesene kadar yukarı çıkılır. Bu noktadan sola doğru gidilir.
- Düşey eksenden okunan L_- değeri 1. adımda okunan toplam gürültü seviyesinden çıkartılır ($L_{S+N} - L_-$). Bu işlemler sonucunda makinanın gürültü seviyesi (L_S) bulunur.

Ses basınç düzeylerinin çıkartılması, Şekil 1.9'da verilen grafikten yararlanılarak yapılır.



Şekil 1.9 Ses düzeylerinin çıkartılması

Örnek olarak, gürültüye katkısı bilinmek istenen bir makinanın yanısıra başka gürültü kaynaklarının da yer aldığı bir fabrikada, belli bir noktadaki toplam basınç düzeyi L_{s+N} 'nin ve bu makina dışındaki kaynakların oluşturduğu gürültü zeminine ait basınç düzeyi L_N 'nin ölçülmesiyle makinanın basınç düzeyi L_s 'nin hesaplanması istensin. Bu amaçla önce makina çalışırken $L_{s+N} = 60$ dB, daha sonra da makina durdurularak $L_N = 53$ dB ölçülmüş olsun. Bu durumda işlem şöyle gerçekleştirilir:

- 1) İki dB düzeyi arasındaki fark hesaplanır: $\Delta L = 60 \text{ dB} - 53 \text{ dB} = 7 \text{ dB}$,
- 2) Eğriden ΔL 'ye karşılık gelen L_- değeri okunur: $L_- = 1 \text{ dB}$,
- 3) Okunan L_- toplam basınç düzeyi L_{s+N} den çıkartılarak L_s hesaplanır:

$$L_s = L_{s+N} - L_- = 60 \text{ dB} - 1 \text{ dB} = 59 \text{ dB}$$

Aynı işlem analitik olarak yapıldığında $L_s = 59,033$ dB bulunur. Yine grafik yardımıyla bulunan sonuç yeterli hassasiyettedir.

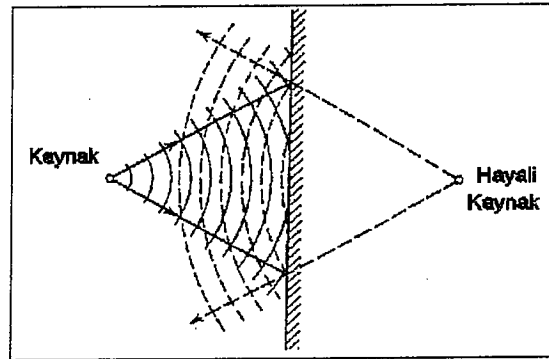
Burada şunun da belirtilmesi yerinde olur ki verilen grafik her türlü basınç düzeyi çıkartma işleminde geçerli olmakla birlikte, verilen örnekteki belli bir gürültü fonunda yapılan ölçüm aracılığıyla bir makinanın ses basıncı düzeyinin belirlenmesi yöntemi, $\Delta L < 3$ dB olması halinde, bu durum aşırı geriplan gürültüsüne karşılık geldiğinden,

hassas sonuç vermez. Böyle durumlarda önce geriplan gürültüsünü azaltmaya çalışmak, ölçümleri daha sonra tekrarlamak gerekir. Öte yandan $\Delta L > 10$ dB olması halinde de geriplan gürültüsü ihmal edilebilir mertebededir ve doğrudan doğruya $L_s = L_{s+N}$ alınabilir.

1.8 Sesin Yayılma Ortamındaki Engellerin Etkileri

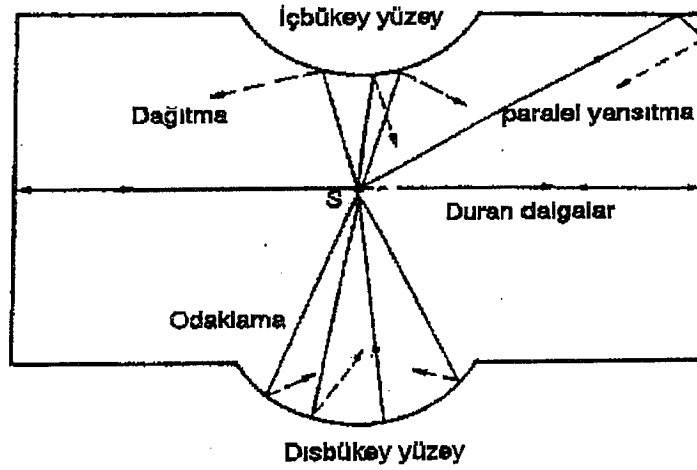
Ses dalgalarının yayılma yolları üzerinde, içinde yayıldıkları ortamınkilerden farklı fiziksel özelliklere sahip engeller çıktığında sesin yansıması, kırılması, yutulması gibi fiziksel olaylar ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu fiziksel olaylar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Sesin Yansıması: Ses dalgaları yayıldıkları ortamlarda bir engelle karşılaştıklarında belli bir kayıpla bu engelin yüzeyinden, ışık ışınlarının bir aynadan yansımasına benzer bir biçimde yansır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Sesin yansıması

Yine ışık ışınlarındakine benzer bir şekilde, dışbükey yüzeylerin sesi dağıtma, içbükey yüzeylerin odaklama, dik köşelerin paralel yansıtma özellikleri vardır.



Şekil 1.11 Yüzey şekli ve yansıma

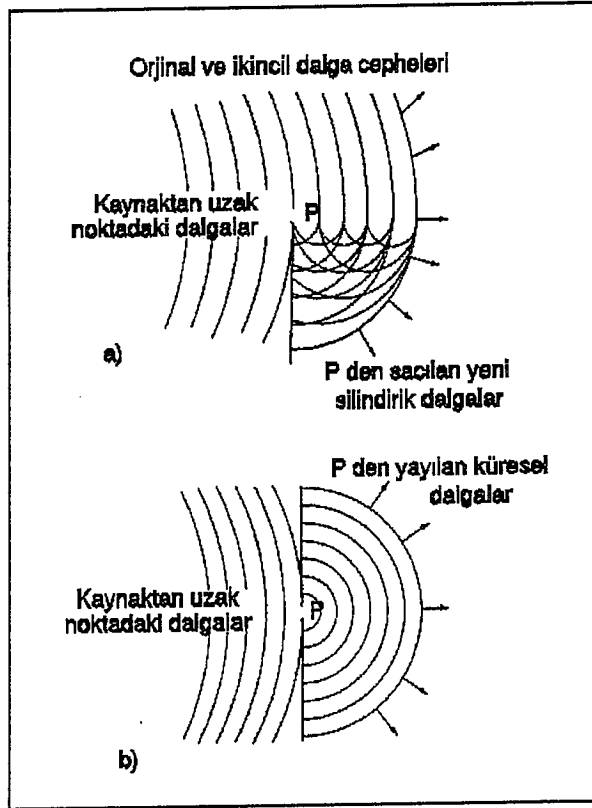
Paralel yansıtıcı yüzeyler, aralarındaki uzaklık sesin yarı dalga boyunun tam katı olduğunda düğüm noktalarında sıfır olmak üzere ses basıncının konumdan konuma değişmesi sonucunu doğuran duran dalga oluşumuna yol açarlar. Bu şart sağlanmadığında da üstüste yansımalar sonucu dalgalanan çınlamalar şeklinde duyulan vuru olayı meydana gelir. Bu nedenle konser salonu, okuma salonu gibi akustik özellikleri önem taşıyan mimari yapılarda paralel yüzeyler arzu edilmezler.

Sesin Yutulması: Ses dalgası bir yüzeyle karşılaştığında enerjisinin bir kısmını kaybeder. Buna sesin yüzey tarafından yutulması denir. Yüzeylerin ses yutma özelliği, pürüzlülük, gözeneklilik, esneklik gibi pek çok fiziksel özelliklerinin yanı sıra, gelen sesin frekansının da bir fonksiyonudur. Yüzeylerin ses yutma kabiliyetleri, değeri 0 ile 1 arası değişen bir ses yutma katsayısı yardımıyla tanımlanır. 0, sesin hiç yutulmadığını (ideal yansıtıcı malzeme); 1 ise tamamen yutulduğunu (ideal yutucu malzeme) gösterir.

Sesin Kırılması: Ses dalgaları yayıldıkları ortamda yollarına çıkan bir engeli aşarken yayılma doğrultularında az ya da çok sapma ortaya çıkar. Bu olaya sesin

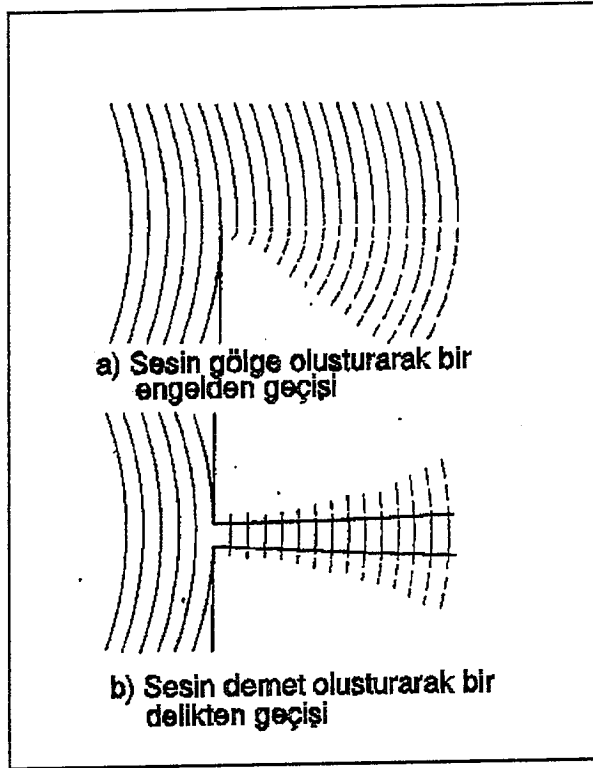
kırılması denir ve engelin arkasındaki bölgede keskin hatlı bir ses gölgesinin oluşmasına engel olur. Kırılma olayı, engel sınırlarının yeni bir ses kaynağı gibi yeni ses dalgalarına yol açmasıyla açıklanmakta ve engel boyutları sesin dalga boyu yanında ne kadar küçükse o kadar belirgin olmaktadır. Buna göre, aynı engelde uzun dalga boyu, yani düşük frekansa sahip ses dalgalarının daha çok; kısa dalga boyu, yani yüksek frekansa sahip ses dalgalarının ise daha az kırılmaları söz konusu olmaktadır.

Şekil 1.12' de düşük frekanslı bir ses dalgasının bir engelden ve bir delikten geçişi gösterilmiştir. Birinci halde engelin kenarı bir doğrusal ses kaynağı gibi davranarak yeni silindirik dalgalara; ikinci halde de delik noktasal bir kaynak gibi davranarak yeni küresel dalgalara yol açmakta ve her iki halde de bu bölgelerde ses düzeyinde önemli düşmeler söz konusu olmakla birlikte bariz bir ses bölgesi oluşmamaktadır.



Şekil 1.12 Düşük frekanslı sesin davranışı.

Şekil 1.13 ise yüksek frekanslı bir ses dalgasının bir engel ve bir delik karşısındaki davranışını göstermektedir. Bu durumda engellerin ardında bariz ses gölgeleri oluşmakta, bu nedenle delikten geçen ses, bir ses demeti halini almaktadır. Ses bir engel ile karşılaştığında yukarıda sıralanan olaylara ek olarak, gelen sesin bir miktarının da engel ortamı tarafından iletildiğini belirtelim.



Şekil 1.13 Yüksek frekanslı sesin davranışı

1.9 Ses Dalgalarının Frekans Bileşenleri

Bölüm 1.2'de verilen örnekteki sinüsoidal ses dalgası mümkün olan en basit yapıdaki ses dalgası türünü oluşturmaktadır. Genliği ve frekansı (ya da periyodu) verildiğinde bütün özellikleriyle tamamen belirli olur. Bu tür seslere arı ses veya saf ton ses denir (Şekil 1.14a) ve ancak yapay olarak üretilebilir.

Frekansların oranı rasyonel sayı olan (örneğin 1/3) iki saf ton sesin birleşmesiyle artık saf ton olmayan, ancak periyodik olan ses dalgaları elde edilebilir. (Şekil 1.14b). Böyle bir sesi, kendini oluşturan saf ton seslere ayırmak mümkündür. Bu matematiksel olarak bir Fourier serisi açılımıyla, pratikte ise sadece belli frekans aralıklarındaki seslerin geçmesine izin veren filtrelerle donatılmış ses ölçüm aletleriyle gerçekleştirilebilir. Bu işleme frekans analizi, her bir frekansa sahip bileşenin belli bir fiziksel büyüklük (örneğin genlik) bakımından katkısının gösterdiği grafiklerle de frekans spektrumu denir (Şekil 1.14, sağ kolon).

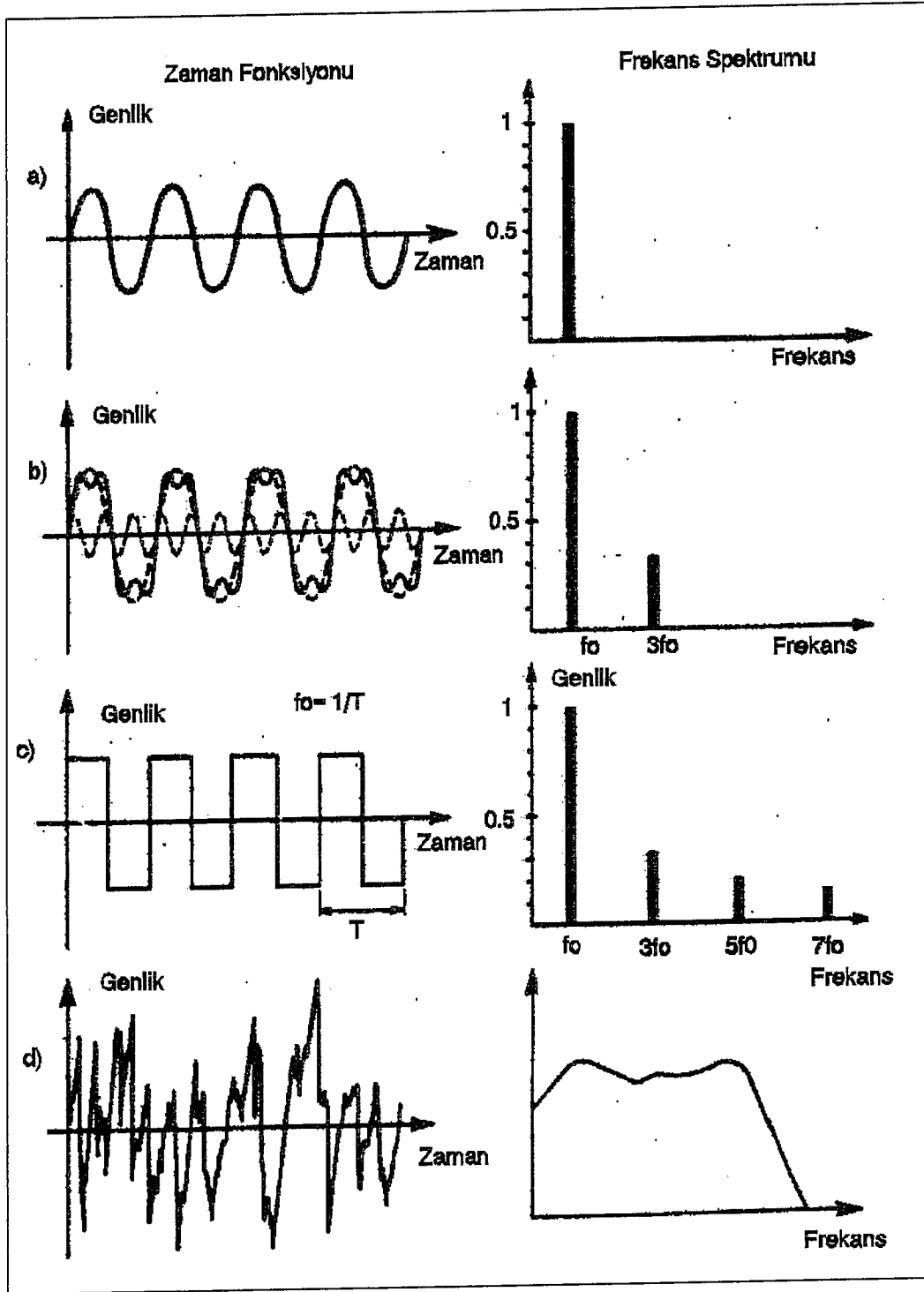
Saf ton seslerin toplamından ibaret olmayan periyodik ses dalgaları da bulunabilir (Şekil 1.14c). Bunlar da $f_0 = 1/T$ frekansına sahip bir temel harmonik ve frekansı onun tam katı olan sonsuz adet harmoniğin bir bileşimi şeklinde ifade edilebilir. Periyodik ses dalgalarının frekans spektrumunda sadece f_0 frekanslı saf ton ses ve onun harmonikleri görülür.

Günlük hayatta karşılaşılan ses dalgaları ne saf ton ses ne de periyodiktir. Günlük hayatta karşılaşılan seslere karmaşık ses denir (Şekil 1.14d). Karmaşık seslerin frekans spektrumu artık sadece ayırık harmoniklerde değil, sürekli olarak yayılmış bütün frekanslarda bileşenler içermektedir.

1.10 Oktav ve 1/3 Oktav Bantları

Pratikte bir sesin frekans analizinin belli aralıklardaki frekansların geçmesine izin veren filtreler kullanarak gerçekleştirildiğini belirtmiştik. Bu aralıklara frekans bandı denir. Ölçümlerde kullanılacak frekans bantlarında belli bir standartlaşmaya gidilmiş ve Oktav, 1/3 Oktav, v.b. bantları tanımlanmıştır.

Oktav bantları: Bandın alt ve üst sınır frekansları sırasıyla f_1 ve f_2 , bandı tanımlayan



Şekil 1.14 Çeşitli sinyallerin zaman ve frekans bağımlılıkları

merkez frekansı ise f_0 olmak üzere

$$f_2 = 2f_1 \quad (1.18)$$

ve

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1.19)$$

şeklinde tanımlanmışlardır. Merkez frekansın alt ve üst sınırların aritmetik değil, geometrik ortalaması olduğuna ve üst sınır alt sınırın iki katı olduğundan yüksek frekans bantlarının daha geniş olduğuna dikkat ediniz.

1/3 Oktav Bantları: Oktav bantlarının sağladığı çözümüleme yetinilemeyen durumlarda daha dar bantlar kullanılır. Bunlardan en yaygın kullanılanı 1/3 oktav bantlarıdır. Her bir oktav bandının üçe bölünmesiyle elde edilen 1/3 oktav bantlarında alt sınır, üst sınır ve merkez frekansları için

$$f_2 = \sqrt[3]{2} f_1 \quad (1.20)$$

ve

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

bağıntıları geçerlidir.

1/3 oktav bantlarıyla sağlanan çözümülemenin de yetmediği durumlarda 1/n oktav bantları kullanılabilir. Bunlarda da

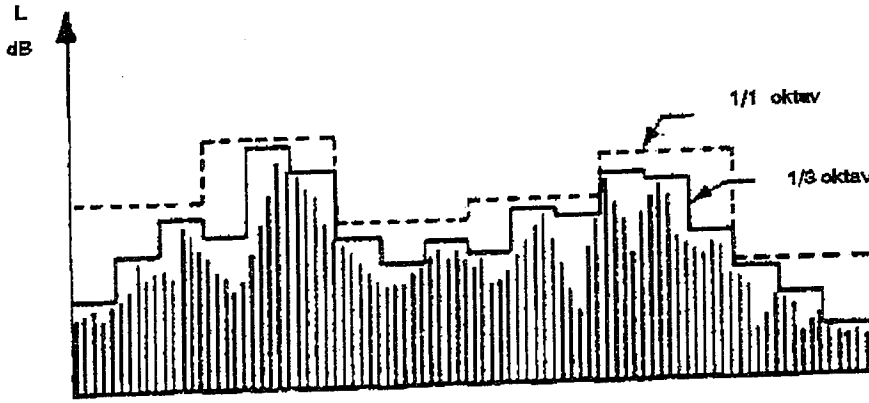
$$f_2 = \sqrt[n]{2} f_1 \quad (1.21)$$

ve

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1.22)$$

bağıntıları geçerlidir.

Şekil 1.15'de ise aynı gürültünün oktav ve 1/3 oktav bantları kullanarak elde edilmiş frekans spektrumları, çok dar bant aralığı kullanarak elde edilmiş spektrumu ile birlikte gösterilmiştir. Bu şekilden frekans çözömlemesinin bandın daralmasıyla nasıl arttığı açıkça görölmektedir.

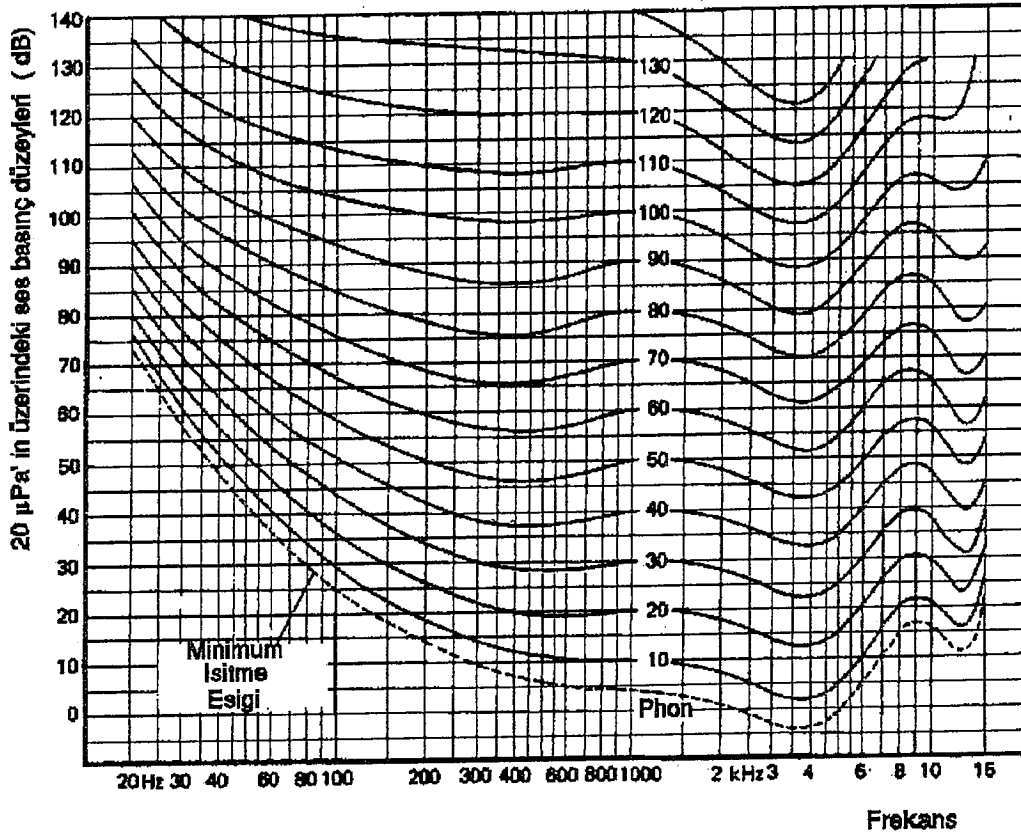


Şekil 1.15 Oktav bantları ve çözömleme

1.11 Saf Ton Seslerde Ses Yüksekliği Düzeyi

Güröltü ile ilgili ölçömlerde, yukarıda gördüğöümüz fiziksel büyüklüklerin tek başına bir anlam taşımayacakları açıktır. Önemli olan sesin örneğın basınç düzeyi değil, insanın sesi ne kadar yüksek algıladığıdır. İnsan kulağı farklı frekanslardaki seslere farklı hassasiyet göstermektedir. İnsanın ses karşısındaki öznel durumunu yansıtabilmek için çok sayıda denek üzerinde öznel ses yüksekliği deneyleri yapılmış ve Şekil 1.16'deki eş yükseklik düzeyi eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerin elde edilmesinde izlenen yol şudur: Bir denek alınmakta ve kendisine 1000 Hz frekansta ve örneğın 10 dB ses basınç düzeyinde bir ses referans olarak dinletilmektedir. Daha sonra farklı bir frekansa geçilerek ses basınç düzeyi sıfırdan arttırılmaya başlanmakta ve referans sesiyle aynı yüksekliğe ulaşıldığında belirtmesi istenmektedir. Bu yükseklik işaretlendikten sonra aynı işlem değişik frekanslar için tekrarlanmaktadır. Böylece 1000 Hz' deki 10 dB ile eş yükseklikte algılanan sesler belirlenmiş olmakta ve bunlar

bir eş yükseklik eğrisiyle birleştirilmektedir. Bu eş yükseklik eğrisinin temsil ettiği yükseklik düzeyi, referans sesin dB basıncı olan 10'a atfen 10 Phon diye adlandırılmaktadır. Bundan sonra yine 1000 Hz frekansta, fakat bu kez ise, örneğin



Şekil 1.16 Saf ton seslerde eş yükseklik düzeyleri

20 dB basınç düzeyinde bir ses referans alınarak 20 Phon eş yükseklik düzeyi elde edilmektedir. Böylece, insanın ses yüksekliği hakkındaki subjektif yargısıyla, fiziksel ve ölçülebilir birer parametre olan frekans ve basınç arasında bir ilişki kurulmuş, ayrıca bu subjektif yargıya Phon adı verilen bir birim eşleştirilmiş olmaktadır.

Eş yükseklik düzeyi eğrilerinin incelenmesi, insan kulağının düşük ve çok yüksek frekanslı seslere karşı pek duyarlı olmadığını, buna karşılık 4000 Hz civarında frekanslara sahip seslere karşı aşırı duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Yukarıda tanımlanan Phon birimi, dB ölçeğinde verilmiş basınç düzeyleri yardımıyla tanımlandığından ses yüksekliği için logaritmik bir ölçek oluşturmaktadır. Sadece eş yükseklikler söz konusu olduğunda bunun hiç bir mahsuru olmamakla birlikte, farklı yükseklikleri birbiriyle karşılaştırabilmek için logaritmik olmayan bir ölçüye daha ihtiyaç duyulmuştur. Yine denekler üzerinde yürütülen araştırmalar, ses yüksekliği düzeyinde her 10 Phon'luk artışın insanda sesin iki kat yükseldiği hissini uyandırdığını ortaya koymuştur. Bu tespite dayanarak ve 40 Phon luk ses düzeyini 1 olarak

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}} \quad (1.23)$$

S : Sone

P : Phon

şeklinde, Sone adı verilen yeni bir birim tanımlanmıştır. Bu birimin ölçtüğü büyüklük ses yüksekliği düzeyi değil, doğrudan doğruya ses yüksekliği adını alır ve bu birimde verilen yükseklik ölçüsü iki katına çıktığında ses yüksekliği hakkındaki sübjektif his de iki katına çıkar.

1.12 Ses Ölçümlerinde Kullanılan Diğer Terimler

L_{eq} Eşdeğer gürültü düzeyi: Bir dalgalı sesin eşdeğerli ortalama düzeyidir. Verilmiş bir zaman aralığında, aynı ortalama enerjiyi taşıyan sürekli bir durgun gürültünün düzeyine eşit olarak alınmakta ve örnek zamanlarda gözlenen ses enerjilerinin aritmetik ortalaması biçiminde tanımlanmaktadır. L_{eq} , gürültünün zamansal değişimlerinin yanısıra, tepe noktalarını da hesaba katar.

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (1.24)$$

T : örnek zaman süresi

L_t : örnek zamanlarda gürültü düzeyleri, dB

L_{10} , L_{50} , L_{90} düzeyleri: Örnek alınan ölçüm zaman süresinin % 10, 50 ve 90'ında aşılacak değerlerdir. L_{10} , ölçüm süresinceki maksimum gürültü seviyesini; L_{50} , ortalama gürültü düzeyini; L_{90} ise geri kalan gürültüsünü tanımlamakta kullanılır. ($L_{10} - L_{90}$) terimi gürültü iklimi olarak adlandırılır.

L_{AE} Ses etkilenim düzeyi: SEL olarak kısaltılan ses etkilenim düzeyi bir uçak uçuşu gibi izole olan gürültü olaylarının enerji bileşenini ifade etmek için kullanılır. Aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_1+T} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (1.25)$$

t_0 : Referans zaman aralığı (1 s)

Ses etkilenim seviyesi, L_{eq} eşdeğer gürültü düzeyi ifadesinden de elde edilebilir.

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{t_0}{T} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_{AEi}} \right) \quad (1.26)$$

L_{dn} Gece-gündüz ortalama ses düzeyi: 22:00 - 07:00 aralığındaki gece zamanında oluşan gürültü için 10 dB düzeltilmiş $L_{Aeq,T}$ değeridir.

L_{NP} Gürültü kirlilik düzeyi: Bu ifade iki terimden oluşmaktadır. Bunlardan birisi eşdeğer sürekli ses düzeyi, ikincisi ise seviyedeki dalgalanmalardan kaynaklanan

şikayetteki artıştır. Aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$L_{NP} = L_{Aeq,T} + K\sigma \quad (1.27)$$

Burada

$L_{Aeq,T}$: Ölçme aralığındaki A-ağırlıklı sürekli eşdeğer ses düzeyi.

σ : Ölçüm aralığındaki anlık düzeyin standard sapması.

K : Bir katsayı olup genellikle 2.56 alınır.

2

GÜRÜLTÜ

ÖLÇÜMLERİNE GİRİŞ

2	GÜRÜLTÜ ÖLÇÜMLERİNE GİRİŞ	2.3
2.1	Giriş	2.3
2.2	Ses Düzeyi Ölçerler ve Özellikleri	2.4
2.3	Çevresel Gürültü	2.8
2.4	Gürültü Ölçümlerinde Dikkat Edilecek Noktalar	2.8
2.5	Mikrofon Yüksekliği	2.11
	2.5.1 Açık Alanlarda Ölçümler	2.11
	2.5.2 Binaların Yakınında Açık Alanda Yapılan Ölçümler	2.11
	2.5.3 Bina İçinde Yapılan Ölçümler	2.12
2.6	Kaydedici Kullanılması	2.13
2.7	Frekans Analizinin Kaydedilmesi	2.13
2.8	Gürültü Haritası	2.14
2.9	Gürültü Ölçüm Raporu	2.16
2.10	Gürültü Tipleri ve Ölçümleri	2.17
	2.10.1 Geriplan Gürültüsü	2.18
	2.10.2 Kararlı Gürültülerin Ölçümü	2.19
	2.10.3 Kararlı Gürültü Kriteri	2.20
	2.10.4 Kesikli Değişken Gürültü Düzeyleri	2.20
	2.10.5 Gürültü Dozunun Ölçülmesi	2.23
	2.10.6 Darbe Gürültüsü Kriteri	2.23
	2.10.7 Darbe Gürültüsünün Ölçülmesi	2.24
2.11	Gürültü Değerlendirme Eğrilerinin Kullanımı	2.24
2.12	NC Eğrileri	2.25

Ses ölçümleri rahatsız edici seslerin doğru ve bilimsel analizini sağlar. Bireyler arasındaki fiziksel ve psikolojik farklılıklardan dolayı, belli bir kişi için rahatsızlığın derecesi bilimsel olarak ölçülemez. Fakat ölçümler, farklı şartlar altında, rahatsız edici sesleri kıyaslayan nesnel bir anlam verir.

Rahatsız edici sesler işitme kayıplarına yol açabilir. İşitme kaybının derecesi, bireylerin işitme hassasiyetini belirleyen **"ODYOMETRİ"** ile ölçülebilir [3]. Bu nedenle ses ölçümleri, işitme koruma programlarının önemli kısmını oluşturur.



Şekil 2.1 Odyometrik test

Sonuç olarak sesin ölçümü ve analizi hava alanlarından otoyollara, evlere ve kayıt stüdyolarına dar olan gürültü azaltma programlarının güçlü bir diyagnostik aracıdır.

Çizelge 2.1 Gürültü ölçümü ile ilgili Standartlar:

İLGİLİ STANDARD	KONUSU
IEC 651	Ses düzeyi ölçerler
IEC 804	Eşdeğer gürültü düzeyi ölçücüler
IEC 942	Ses seviye kalibratörler
ISO 1999	Terimlerin tanımlanması ve ölçme metodları
ISO 1996	Gürültünün çevreye zararları
ISO 2204	Gürültünün işitmeye olan etkisi

Bir şikayet üzerine veya bir araştırma için gürültü ölçümü yapılırken sistematik bir yol izlemek önemlidir. Gürültüyü azaltma programı aşağıdaki gibi incelenebilir.

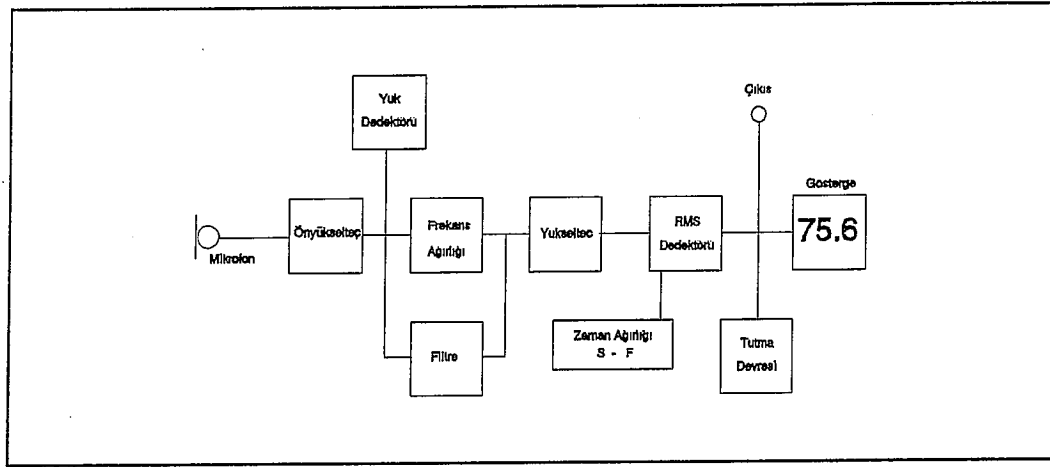
- Ölçme
- Gürültü haritası
- Gürültünün azaltılması işlemleri

Bu işlemler gürültü düzeyinin tatmin edici düzeylere ininceye kadar tekrarlanır. Yüksek gürültü düzeylerinin olduğu sanayide veya başka bir ortamda ölçümden sonra yapılan izolasyonu kontrol ederken paralel olarak bir konuşma programının uygulanması tavsiye edilir. Burada azaltılmış gürültünün konuşmaya etkisi incelenir. Bazı durumlarda bu şart koşulabilir.

2.2 Ses Düzeyi Ölçerler ve Özellikleri

Ses basıncı ve ağırlıklanmış ses düzeylerinin ölçümünü yapan cihazlara ses düzeyi ölçer denir. Sonometre ya da desibelmetre gibi adları da anılan bu cihazlar temelde ses dalgalarını algılayarak elektrik sinyaline dönüştüren bir mikrofon,

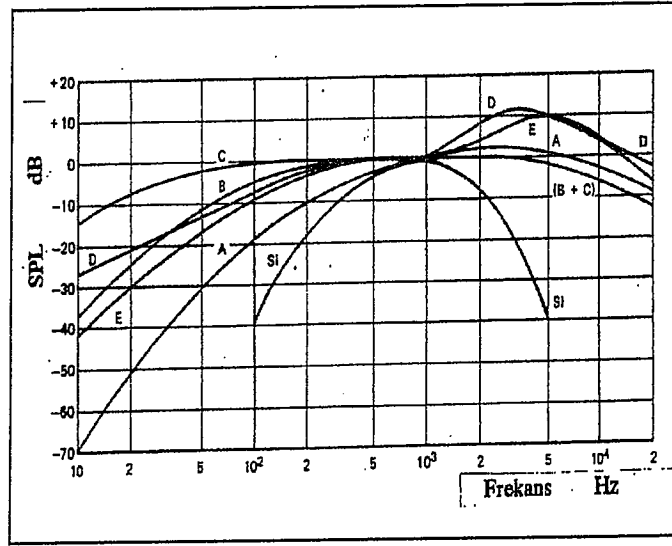
mikrofondan gelen sinyalleri güçlendiren yükselteç donanımı, elektronik olarak ağırlıklama işleminin yapılmasına olanak sağlayan devreler ve ölçülen değerlerin okunduğu gösterge ve ilgili donanımından oluşmaktadırlar [4]. Pil ile çalışan bu cihazların ucunda bulunan mikrofon, ses düzeyi ölçerin doğruluk derecesine bağlı olarak kapasitif, dinamik, piezoelektrik türlerinden bir türde olabilir. Ses düzeyi ölçerler, genelde ses basıncı düzeylerini ölçme olanaklarının yanında en az bir ağırlıklanmış ses düzeyini ölçme yeteneği ile donatılırlar. Uygulamada en çok A-ağırlıklı ses düzeyleri kullandığı için, ses düzeyi ölçerlerin hemen hemen hepsinde A-ağırlıklı ölçüm olanağı bulunmaktadır.



Şekil 2.2 Basit bir ses düzeyi ölçerin blok şeması

Kararsız gürültü düzeylerini ölçebilmek için gösterge biriminin, iki ayrı zaman ağırlıklı **F (fast-hızlı)** ve **S (slow-yavaş)** cevap özelliklerini taşıması ilkesi göz önünde tutulmuştur. Cihaz üzerinde bulunan ilgili düğmenin konumunun F'ye getirilmesi ile kararsız gürültü düzeyleri hızlı olarak izlenebilmektedir. Eğer gürültü kararlı ise, diğer bir deyişle düzeylerde büyük sapmalar yoksa, bu düğme S konumuna alınarak gürültü ölçümleri yapılmaktadır. Bu düzeyler, frekans ağırlık (frequency weighting) düğmesine istenen konuma getirerek, ses basınç düzeyini **Lin, A-ağırlıklı** ya da

C-ağırlıklı olarak ölçülebilir. Bazı ses düzey ölçerler F ve S zaman ağırlığı yanısıra F'den de hızlı "**I**" (**Impulse**) ile gösterilen darbe karakteristikli bir zaman ağırlık konumu daha vardır. Darbe türü gürültüler, zaman ağırlık düğmesi I konumunda iken ölçülür. Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nde darbe türü gürültü ile ilgili olarak verilen 140 dBA sınırı, gürültü düzeyleri ancak I yanıt karakteristiği ile yapılan ölçümlere uygulanabilmektedir.



Şekil 2.3 Frekans ağırlık şebekelerinin karakteristikleri [5]

Gelişmiş ses düzeyi ölçerler, ses düzeylerinin zamana göre integralini almaya olanak sağlayan elektronik devreler ile donatılmıştır. Bu tür ses düzeyi ölçerler yardımı ile eşdeğer sürekli ses düzeylerini (L_{eq}) ve ses etkilendirme düzeylerini (SEL) ölçüm olanağı bulunmaktadır. Her iki ölçüm için gerekli integrasyon işlemi, cihaz üzerinde bulunan bir başlatma (RESET) düğmesine basılarak başlatılır. SEL ölçümü için, gürültü çıkaran veya araç gürültüyü yaymayı sürdürdüğü sürece ölçüm alınır. L_{eq} ölçümü ise genellikle belli bir süre için, örneğin beş dakika, sürdürülür. Cihaz üzerindeki bir düğme, anlık ses basıncı ya da ses düzeyleri, SEL ya da L_{eq} konumlarından birine getirilerek istenilen ölçüm yapılır. Burada genel çizgileri ile özetlenen ses düzeyi

ölçerlerin en iyi şekilde kullanımı için üretici firmanın hazırladığı kullanım kılavuzlarından yararlanılması gerekmektedir.

Ölçülen düzeylerin desibell ölçeğiyle okunduğu gösterge, üzerinde bir ibre taşıyan analog veya rakamların doğrudan okunduğu sayısal tipi olabilir. Gelişmiş ses düzeyi ölçerler, dışardan kolayca takılabilen elektronik filtre devreleri ile ölçülen gürültünün oktav band analizini yapma olanağına da sahiptirler.

Ses düzeyi ölçerler, dört ayrı doğruluk derecesi sınıfına ayrılmaktadırlar (IEC 651). Tip 0 diye bilinen ses düzeyi ölçerler, laboratuvar referans standardı olarak nitelendirilmekte ve diğer ses düzeylerinin kalibrasyonu ve denetimi için kullanılmaktadır. Tip 1 ses düzeyi ölçerler, laboratuvar çalışmalarında ve denetimli ses alanlarında kullanıma yönelik olarak Tip 0'dan daha az hassas cihazlardır. Genel amaçlı ses düzeyi ölçerler Tip 2 olarak adlandırılmakta ve genel olarak laboratuvar dışı saha çalışmalarında kullanılmaktadırlar. Ön çalışmalar ve gürültü düzeyleri hakkında fikir edinmek için kullanılabilen ses düzeyi ölçerler Tip 3 olarak nitelendirilmektedirler. Burada verilen sınıflandırma, ses düzeyi ölçerlerin elektronik özelliklerine ve mikrofona hassasiyetine göre yapılmaktadır. Sayısal elektronik teknolojinin son yıllardaki gelişmesinin sonucunda, belli bir ölçüm süresi içinde ölçülen en yüksek ve en düşük düzeylerin değerleri sayısal teknoloji ile üretilmiş özel ses düzeyi ölçerlerin belleklerinde saklanabilmekte ve istendiğinde göstergeden okunabilmektedir.

Gürültü ölçümünde izlenecek işlem sırası burada iki ayrı başlık altında verilecektir. İlk kısımda ses düzeyi ölçer üzerinde yapılacak işlemler özetlenecek, ses düzeyi ölçerin ölçüm ortamında kullanım şekli ile ilgili işlemler ikinci kısımda tartışılacaktır.

2.3

Çevresel Gürültü

Çevresel gürültü, belli özel noktalarda, kaynağına bakılmaksızın toplam gürültü ölçümlerini içermektedir. Bu nedenle ortamdaki gürültü bir ya da birkaç kaynaktan oluşabilir ve aynı zamanda duvarlardan, tavandan ve diğer makinalardan olan yansımaları içermektedir.

Bir işçinin çalışma yerinde maruz kaldığı gürültü çevresel gürültüdür. Çevresel gürültüye, trafik gürültüsü, fabrika sınırları, çalışma bürolarındaki gürültü ve eğlence yerlerindeki gürültüler örnek olarak verilebilir. Ölçümler, işçinin makinaya yakın veya uzak olmasına veya yakında çalışan başka bir makinanın olup olmadığına bakılmaksızın işçinin çalıştığı yerde yapılır. Bu koşullar gürültü seviyesini azaltmaya yönelik ölçümler için göz önüne alınabilir ancak işçinin gerçekte maruz kaldığı seviyeyi ölçerken göz önüne alınmaz.

Çevresel gürültü çeşitli yönlerden geldiği için ses düzeyi ölçer yönsüz olmalıdır. Ses düzeyi ölçer ses kaynaklarının nerede olduklarına bağlı olmaksızın düzgün cevaba (flat response) sahip olmalıdırlar.

2.4

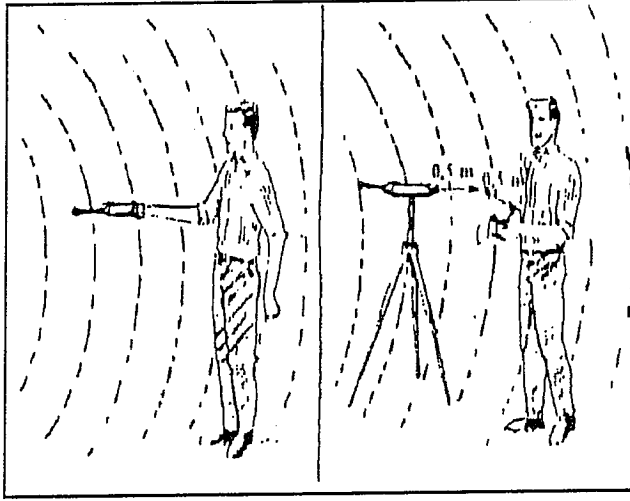
Gürültü Ölçümlerinde Dikkat Edilecek Noktalar

Ölçüme hazır duruma getirilen ses düzey ölçer ile gürültü ölçümleri yapmadan önce aşağıdaki noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Ölçüm yapmadan önce, ölçüm yapılan ortamdaki gürültü kaynakları, yansıtıcı yüzeyler ve ölçüm konumu bir kroki üzerine işlenmelidir.
- Ölçüm düzeneği içinde bulunan cihazların marka, tip ve seri numaraları

kaydedilmelidir. Ayrıca, kullanılan mikrofonun karakteristikleri bilinmelidir.

- Ölçüm aletlerinin kendilerinden olan yansımalarını minimuma indirmek için aletlerin bilhassa ön kısımlarına dikkat edilir. Ölçme esnasında cihazın ve ölçümü yapan operatörün ölçüm sonuçlarını etkilememesine özen gösterilmelidir. Ölçümü yapan teknisyenin yansımaya olan etkisini azaltmak için ses düzeyi ölçer, ölçümü yapan kişiden kol boyu uzaklıkta ve kımıldatmadan tutulmalıdır.



Şekil 2.4 Ses düzeyi ölçer ile teknisyen arasındaki mesafe

- Üç ayaklı sehpa kullanıldığında ise teknisyenin bu sehpadan 0,5-1,0 m mesafede bulunması tavsiye edilir. Böylelikle ölçülen ses alanına vücudun etkisi en az düzeyde tutulmuş olacaktır. Ses düzeyi ölçer sehpa üzerine monte edilerek yapılan ölçümlerde ise, zeminin titreşimsiz olmasına dikkat edilmelidir. Titreşim etkisinde kalan mikrofonlar, ölçülecek gürültü ile ilgisi olmayan sinyaller üreterek hatalı ölçüme neden olabilmektedir. Ses düzeyi ölçerin, yüksek düzeydeki gürültünün etkisinde kalması durumunda kalibrasyonunda değişiklikler olabilmektedir. Bu durumda kalibrasyonun yenilenmesi gerekmektedir.

- Ölçüm konumu belirlenirken ses düzeyi ölçerin manyetik alanlardan

uzak tutulmasına özen gösterilmelidir.

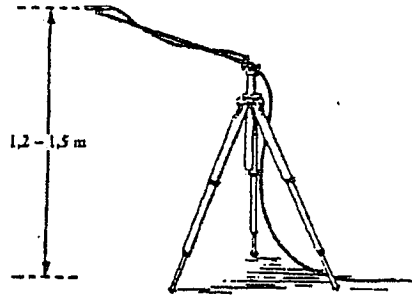
- Ölçüm yapılan ortam hafif rüzgarlı olsa bile ölçümleri etkileyebilmektedir. Açık havada ve hava akışı içinde ölçüm yapılırken mikrofon üzerinde özel korumasının takılı olması gerekmektedir.
- Mikrofonların çok hassas olması nedeniyle tozlu ve nemli ortamlarda ölçüm alınırken yine aynı özel korumanın takılı olması gerekmektedir.
- Ölçüm konumu belirlenirken, o ortamda gürültüden etkilenen kişilerin konumları da göz önüne alınmalıdır.
- Gürültü ölçümünden önce ve sonra ortamdaki geriplan gürültüsü ölçülerek kontrol edilmelidir. Eğer ölçülen düzey ile geriplan gürültüsü arasındaki fark 10 dB den büyük ise ölçülen gürültü düzeyi üzerinde herhangi ek bir düzeltme yapmaya gerek yoktur. Aradaki farkın 10 dB den küçük olduğu durumlarda geriplan gürültüsünün etkisi gözönüne alınmalıdır.
- Ses düzeyi ölçerin ayarlanması işlemi ölçülecek olan gürültünün karakteri ile doğrudan ilgilidir. Örneğin kararlı gürültünün ölçümü yapılacak ise ses düzey ölçerin zaman ağırlık konumu, S (yavaş) seçilmelidir. Değişken karakterli yapıya sahip gürültü ölçülecek ise zaman ağırlığı konumu F (hızlı), frekans ağırlık konumu A-ağırlık olacak şekilde L_{eq} ölçümleri yapılmalıdır.
- Ölçüm raporunda; ölçüm yerini gösteren kroki ile birlikte ölçüm anındaki çevresel şartları (sıcaklık, basınç, nem), gürültü düzeyleri ve gerektiğinde frekans spektrumu olmalıdır.

2.5 Mikrofon Yüksekliği

ISO 1996 Standardı iç ve dış mekanlarda mikrofon konumu hakkındaki esasları vermektedir. Tabiidir ki mikrofonun yüksekliği ölçümün amacına göre değişecektir. Ama genellikle mikrofonun yerden yüksekliği iç ve dış mekanlarda aşağıdaki gibidir.

2.5.1 Açık Alanlarda Ölçmeler

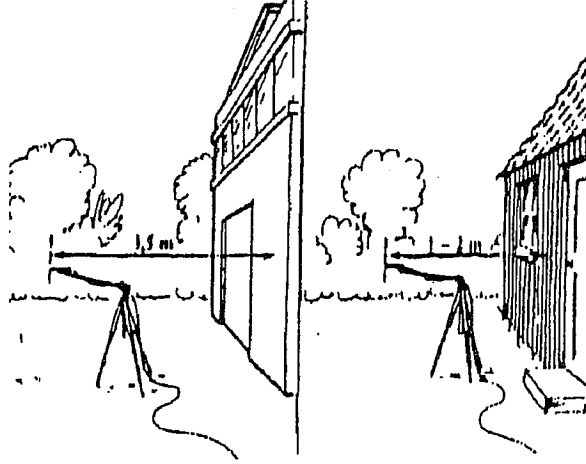
Yansıma etkisinin en aza indirilmesi gerektiğinde; ölçümler, zeminin dışında mümkünse herhangi bir yansımanın meydana geldiği yerlerden en az 3,5 m uzakta yapılmalıdır. Aksi belirtilmedikçe tercih edilen ölçüm yüksekliği zeminden 1,2 m ile 1,5 m arasında olmalıdır.



Şekil 2.5 Ölçümler sırasında mikrofonun yerden yüksekliği

2.5.2 Binaların Yakınında Açık Alanda Yapılan Ölçümler

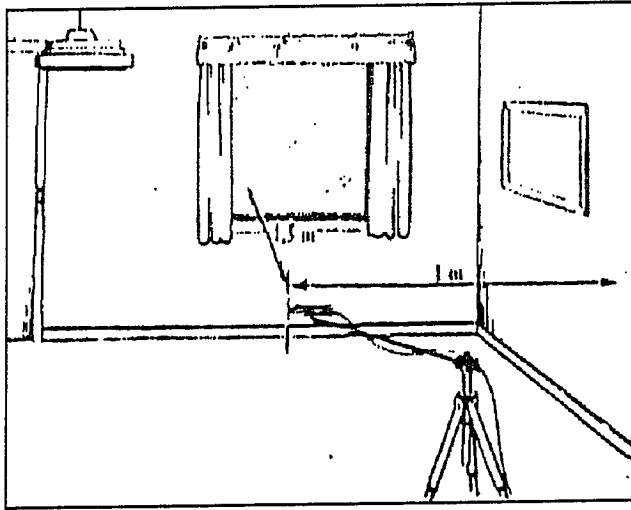
Bu ölçümler ilgili gürültüye maruz kalan binanın yakınında bir yerde yapılmalıdır. Aksi belirtilmedikçe tercih edilen ölçümler zeminden 1,2 m - 1,5 m yüksekliğinde, cepheden uzaklığı ise 1 - 2 m arasındadır.



Şekil 2.6 Binanın dışındaki ölçümlerde mikrofonun konumu

2.5.3 Bina İçinde Yapılan Ölçümler

Bu tür ölçümler gürültünün olduğu kapalı yerlerde yapılır. Aksi belirtilmedikçe tercih edilen ölçüm konumları duvarlardan veya ana yankı yüzeylerinden en az 1 m, döşemeden en az 1,2 m - 1,5 m yükseklikte, pencerelerden 1,5 m uzaklıktadır.



Şekil 2.7 Bina içindeki ölçümlerde mikrofonun konumu

↔
Ses seviyeleri(TS 2606), aralarında $\pm 0,5$ m uzaklık olan en az 3 noktada yapılacak olan ölçümlerin ortalamasını alarak belirlenmelidir. Ölçümler genellikle pencereler kapalı durumda yapılmalıdır. Hacim normal olarak pencereler açık olarak kullanılıyorsa, ölçümler bu koşul altında yapılmalıdır.

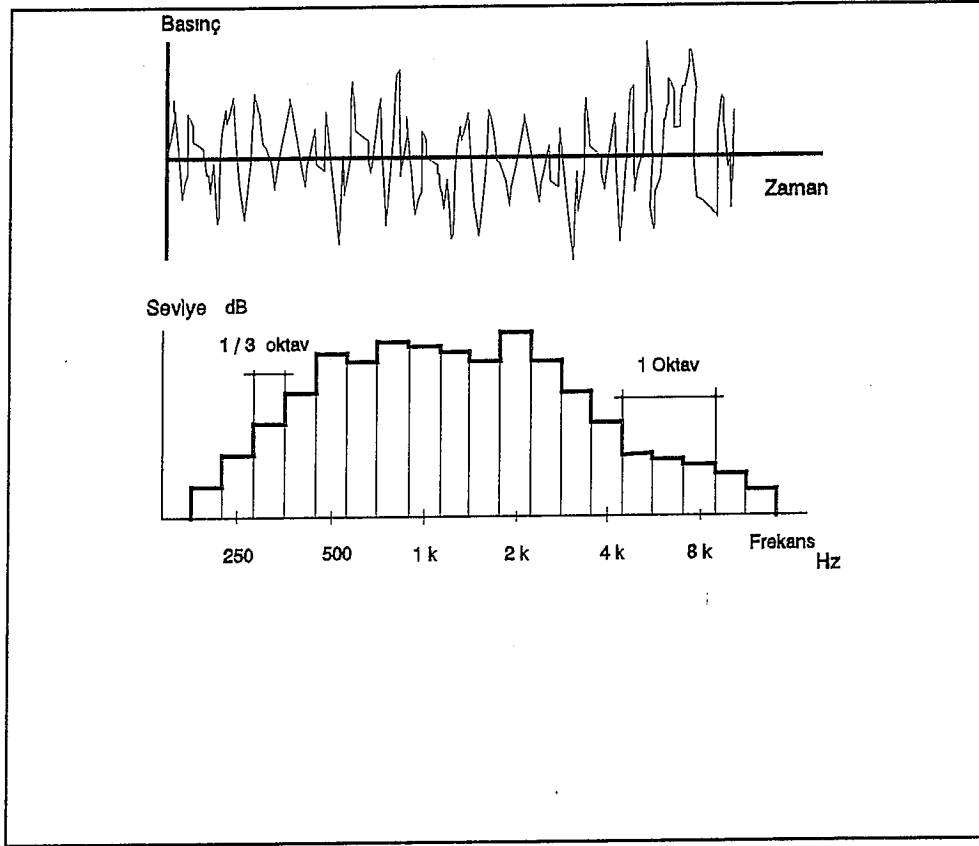
Gürültü kararlı değilse, gürültünün seviyesi ve süresi belirlenmelidir. Gerekiyorsa gürültü seviyesi kaydedilebilir. Ses seviyesinin zamana bağlı olarak gözlenmesinde zaman periyodu gürültünün değişim özelliğine uygun seçilmelidir.

2.6 Kaydedici Kullanılması

Gürültü ölçümlerinin kaydedilmesi genellikle ağır ve sıkıcı bir iştir. Kolaylıkla, okuma-kaydetme hataları olabilir. Bu nedenle ölçüm sonuçlarının doğrudan ölçüm sırasında kaydedilmesini gündeme getirir. Kaydedicilerin hızlı olmaları ve okuma hatalarını ortadan kaldırma avantajlarına ek olarak ölçümlerin daha sonra analiz edilebilme ve grafiklerin daha sonraki ölçümlerle karşılaştırılabilmesi avantajları da vardır.

2.7 Frekans Analizinin Kaydedilmesi

Portatif sinyal kaydediciler, oktav ve 1/3 oktav analizlerini de kaydedebilirler. Kayıt sırasında özel olarak hazırlanmış kağıt kullanılır. Ses basınç düzeyi 31,5 Hz ile 20 kHz arasındaki her bir 1/3 oktav band merkez frekans civarında yatay bir çizgi olarak görülür. Grafiğin sonuna ses basınç düzeyinin lineer seviyesi kaydedilir.



Şekil 2.8 Zamana bağlı olarak değişen bir sesin 1/3 oktavda alınmış spektrumu.

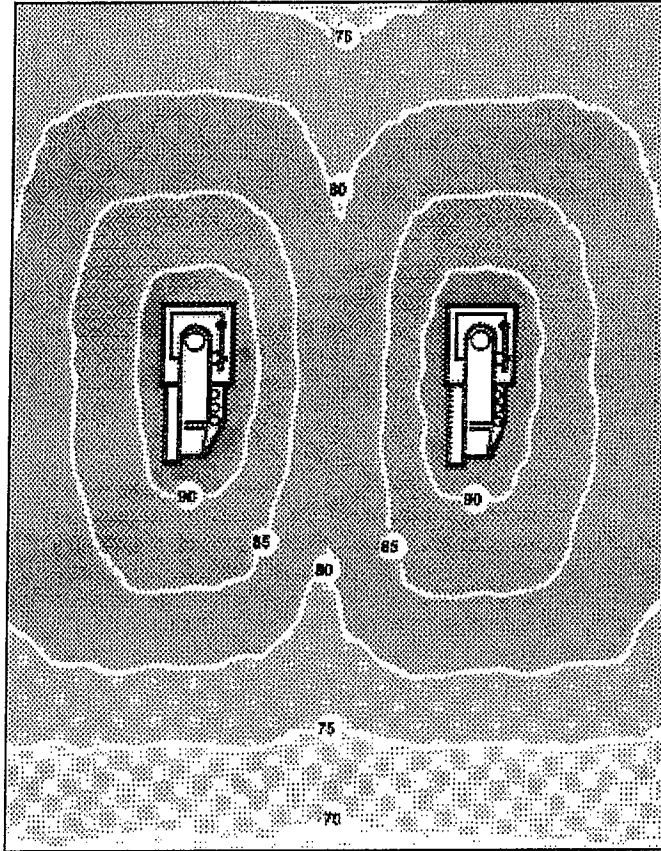
2.8 Gürültü Haritası

Genellikle gürültü azaltma programlarında, ilk adımlarından biri ölçme bölgesinin gürültü haritasının çıkartılmasıdır. Ölçme bölgesinin belirli bir ölçekle krokisi çizilerek belli başlı titreşim kaynağı olabilecek aletlerin konumları işaretlenir. Daha sonra bu

Çizelge 2.2 Akustik ölçmeler için tercih edilen frekanslar

Frekans	Oktav	1/2 Oktav	1/3 Oktav	Frekans	Oktav	1/2 Oktav	1/3 Oktav
16	x	x	x	560			
18				630			x
20			x	710		x	
22,4		x		800			x
25			x	900			
28				1000	x	x	x
31,5	x	x	x	1120			
35,5				1250			x
40			x	1400		x	
45		x		1600			x
50			x	1800			
56				2000	x	x	x
63	x	x	x	2240			
71				2500			x
80			x	2800		x	
90		x		3150			x
100			x	3550			
112				4000	x	x	x
125	x	x	x	4500			
140				5000			x
160			x	5600		x	
180		x		6300			x
200			x	7100			
224				8000	x	x	x
250	x	x	x	9000			
280				10000			x
315			x	11200		x	
355		x		12500			x
400			x	14000			
450				16000	x	x	x
500	x	x	x				

kroki üzerine değişik konumlarda yeterli sayıda alınan ses basınç düzeyleri işlenir. Ne kadar çok noktada ölçüm yapılırsa o kadar detaylı harita elde edilir. Ses basınç düzeyleri eşit olan noktaları birleştiren eğriler gürültü haritasını oluşturur. Böyle bir gürültü haritasından faydalanarak ses basınç düzeylerinin yüksek olduğu yerler belirlenebilir.



Şekil 2.9 Gürültü ölçüm haritasına bir örnek

2.9 Gürültü Ölçüm Raporu

Yapılan ölçümlerden sonra iyi bir raporla sonuçları ortaya koymak çok önemlidir. İyi bir raporda aşağıdaki bilgiler bulunmalıdır.

- Ses sinyalinin tipi

- Ölçme aletinin tipi ve seri numarası
- Ölçme alanının planı ve üzerinde ses düzeyi ölçme cihazının konumları
- Gürültü kaynağı hakkında bilgi
- Geriplan (background) gürültüsü ve kaynağın gürültüsü
- Ölçme tarihi ve zamanı
- Mikrofon yüksekliği

2.10 Gürültü Tipleri ve Ölçülmeleri

Genel olarak bir gürültüyü tanımlayan ses basınç düzeylerinin herhangi bir zaman süresi boyunca gösterdiği değişim, gürültünün değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Kısa veya uzun süreli olabilen bu değişimler, ya da verilmiş bir gürültü kaynağının zaman bağımlılığı, grafik kaydedici araçlar yardımıyla elde edilebilir. Kimi zaman da sesin hem spektral, hem de zamansal değişimlerinin aynı anda analizi gerekir. Bu durumda özel kaydediciler kullanılır.

Genellikle ayırık gürültü olayları, uzakta, tanımlanamayan kaynakların oluşturduğu alçak bir geriplan gürültüsü üzerine eklenirler. Bu gürültülerin tümü çevre gürültüsü, açıkça gözlenebilen gürültü ise gürültü olarak isimlendirilirler.

Zamana göre değişim özelliğine bağlı olarak gürültüler iki gruba ayrılabilir.

1. Kararlı gürültüler: Ortalama gürültü düzeyi ve spektral özellikleri uzun zaman sürelerinde sabit olan gürültülerdir. Bunlar, geniş veya dar band gürültüleri biçiminde olabilirler.

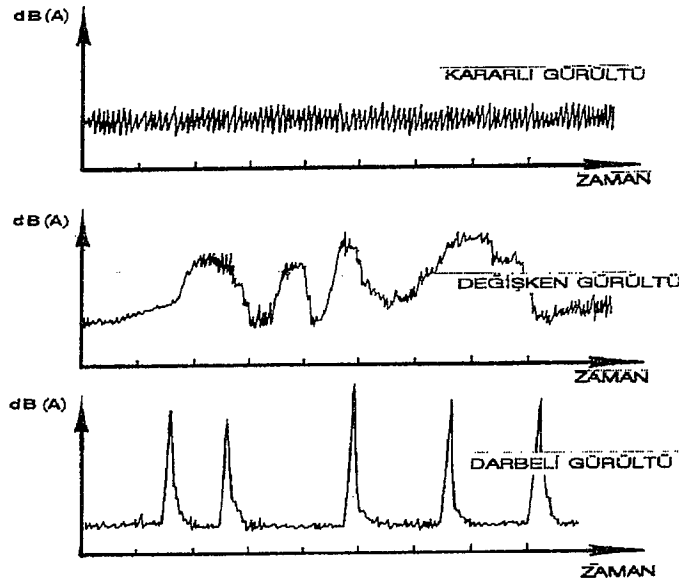
2. Değişken gürültüler: Ortalama gürültü düzeyi ve spektral özellikleri değiştirilebilen gürültülerdir. Bunlar da üç grupta incelenebilirler:

a) Dalgalı gürültüler: Gözlem süresi boyunca, ses basıncının 6 dB kadar değiştiği ve geriplan gürültüsüne en az bir kez eşit olan gürültülerdir.

b) Kesikli Gürültüler: Gözlem süresinde ses basıncının geriplan gürültüsü düzeylerine 2 veya daha çok defa, 1-2 saniye süre ile eşit olduğu gürültülerdir.

c) Darbeli Gürültüler: Ses basınçlarında, her defasında geriplan gürültüsünün üzerine çıkan ani değişimlerin görüldüğü görüntülerdir. Tek bir vuruşun süresi genel olarak bir saniyeden daha azdır.

Gürültü tiplerinin şekilleri aşağıda verilmiştir [6].



Şekil 2.10 Zamana bağlı değişen gürültü tipleri

2.10.1 Geriplan Gürültüsü

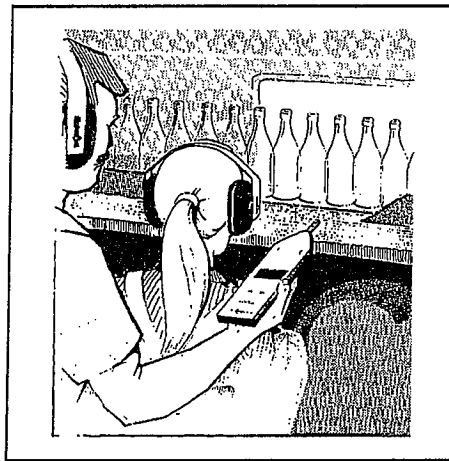
Ölçümlerin doğruluğunu etkileyen bir faktör de, ölçülen ses düzeyi ile kıyaslanabilen

geriplan gürültüsünün seviyesidir. Diğer bir ifade ile geriplan gürültüsü, ilgili sesin duyulmasına engel olmamalıdır. Pratikte, bunun anlamı ölçülecek sesin seviyesi geriplan gürültüsünden en az 3 dB daha fazla olması demektir. Buna rağmen sonucu elde etmek için hala düzeltme yapmaya ihtiyaç vardır.

2.10.2 Kararlı Gürültülerin Ölçümü

Kararlı gürültülerin ölçümü; zaman ağırlığı S, frekans ağırlığı A ya ayarlanmış olan bir ses düzeyi ölçer ile yapılabilir. Gürültü, gürültüye maruz kalan kişinin kafası civarında ölçülmelidir. Bu ölçümün çevresel gürültü ölçümü ile ilgili olduğuna dikkat etmek gerekmektedir. İşçinin çalıştığı makina tek gürültü kaynağı ve hatta baskın gürültü kaynağı olmayabilir. Bu nedenle tüm kaynaklardan yayılan gürültüyü doğru olarak ölçmeyi garanti etmek için kullanılan mikrofon yönsüz (omnidirectional) olmalıdır.

Kararlı gürültülerin ölçülmesi için genel amaçlı ses düzeyi ölçerler kullanılabilir. Darbe gürültüsünü ölçme ya da frekans analizi yapma ihtiyacı ortaya çıktığında bir seri filtrenin takıldığı çok fonksiyonlu bir ses düzeyi ölçer kullanılmalıdır.



Şekil 2.11 Bir işçinin maruz kaldığı gürültünün ölçülmesi

2.10.3 Kararlı Gürültü Kriteri

Kararlı gürültü kriteri çalışma süresi boyunca dBA cinsinden aynı ses düzeyine maruz kalan işçilerle ilgilidir. Tipik olarak işçiler, makinelerin sürekli çalıştığı ve yaklaşık olarak sabit gürültü üreten bölgelerdeki sabit noktalarda çalışırlar.

ISO gürültü dozu üzerinde, diğer bir deyişle işçinin çalışma noktasında haftada 40 saatlik bir çalışma süresinde depolanmış olan mücade edilir maksimum maruz kalmanın yüzdesi üzerinde bir limit koymaktadır. Örneğin 90 dBA'da haftada 40 saatlik süre için % 100 gürültü dozu, 93 dBA'da haftada 40 saatlik süre için % 200 gürültü dozu vardır.

OSHA verilen bir kararlı ses düzeyi için bir günde maksimum maruz kalma süresini kısıtlamaktadır. Örneğin 90 dBA'da 8 saat, 95 dBA'da 4 saat. Örneğin bir işçi 90 dBA'lık kararlı gürültü seviyesinde günde 8 saat çalışmış ise gürültü dozu %100 dür. Benzer şekilde 93 dBA, % 200'lük bir gürültü dozunu gösterir.

Çizelge 2.3 görüldüğü gibi , ISO şartlarına göre gürültü düzeyinde her 3 dB'lik artış, maruz kalınan gürültü dozunu iki katına çıkartır. OSHA şartlarına göre gürültü düzeyindeki 5 dB'lik artış, mücade edilen maksimum maruz süresini % 50 oranında azaltır. 3 veya 5 dB'lik aralığı "q" değeri olarak adlandırılmaktadır. OSHA, her iki gürültü arasındaki sessiz dönemlerde, kulağın tekrar sağlığına kavuşma gücünü göz önünde bulundurduğundan biraz daha esnektir.

2.10.4 Kesikli Değişken Gürültü Düzeyleri

Birçok işçi, çalıştığı yerlerde gürültünün değişiminden ya da başka bir bölgeye gitmelerinden dolayı belirli sayıda kesikli olarak değişken gürültüye maruz kalmaktadırlar. Gürültü kodları, böyle işçilerin günlük çalışma sürelerince aldıkları

kısmi doz serilerini toplama prosedürlerini tanımlarlar. ISO şartlarına göre, çalışma süresinin yarısında 90 dBA, geri kalan yarısında 93 dBA'ya maruz kalınan bir durumun örnek olarak alalım. 90 ve 93 dBA'daki çalışma süreleri, % 100 ve % 200 gürültü dozunu gösterdiklerinden yarı periyot dozları % 50 ve % 100 olduğundan toplam doz % 150 olacaktır.

Çizelge 2.3 Kararlı gürültü kriter tablosu

ISO Gürültü Dozu	dBA	OSHA Maks Zaman Saat-dak.	ISO Gürültü Dozu	dBA	OSHA Maks Zaman Saat-dak.
10	80	-	800	99	02-15
15	82	-	1000	100	02-00
20	83	-	1250	101	01-44
25	84	-	1600	102	01-31
30	85	16-00	2000	103	01-19
40	86	13-56	2500	104	01-09
50	87	12-08	3150	105	01-00
60	88	10-34	4000	106	00-52
80	89	09-11	5000	107	00-46
100	90	08-00	6300	108	00-40
125	91	06-56	8000	109	00-34
160	92	06-04	10000	110	00-30
200	93	05-17	10250	111	00-26
250	94	04-36	16000	112	00-23
315	95	04-00	20000	113	00-20
400	96	03-29	25000	114	00-17
500	97	03-02	31500	115	00-15
630	98	02-50			*

* : Henüz karara bağlanmamış

İlave olarak OSHA ve birçok diğer Ulusal Standartlar herhangi bir zaman dilimindeki kesinlikle geçilmemesi gereken 115 dBA'lık "yavaş" cevabı empoze etmektedirler.

Hareketli işçilerin gürültü dozlarının belirlenmenin bir yolu iş-çalışması görüşmesidir. Önce fabrikada her bir çalışma noktasında gürültü düzeylerini belirlemek için gürültü araştırması yapılır. Sonra işçinin nerelerde ne kadar süre ile çalıştığı belirlenir. Bu yöntem, çok sayıdaki işçinin maruz kaldığı gürültü dozunun hızlı olarak belirlenmesini sağlar. Dahası periyodik yenilemeler hızlı olarak yapılabilir. Bu metod, doğrudan bilgisayar kayıtlarını korumak gereğini ortaya çıkarır. Aynı zamanda gürültü kontrolünde gürültü dozunun yüksek olduğu yerlerin belirlenmesinde yararlıdır.

Çizelge 2.4 Gürültüye maruz kalma tablosu

GÜRÜLTÜYE MARUZ KALMA KAYDI				
Adı ve Soyadı:		Ahmet Ayyıldız		
Tarih: 8.12.1985		İmza:		
KONUŞMA		ISO KRİTERİNE GÖRE HESAPLAMA		
Çalışma Yeri	% Zamanı	dBA	8 saatlik Doz	Kısmi Doz*
A-5	60	85	% 30	% 18
A-8	5	95	% 315	% 16
B-21	10	88	% 60	% 6
D-13	25	91	% 125	% 31
ÖNERİLER:			Toplam Doz: % 71	
ISO limitleri içinde				
$\text{Kısmi Doz}^* = (\% \text{ Zaman} * 8 \text{ saatlik Doz}) / 100$				

2.10.5 *Gürültü Dozunun Ölçülmesi*

Gürültü seviyelerinin beklenmedik şekilde değiştiği yerlerde, gürültüye maruz kalmayı ve 115 dBA'yı geçip geçmediğini ölçmek için **Personel Doz Metreler** kullanılır. Personel doz metreler kemere veya gömleğin cebine takılabilen, küçük, integral alan ses düzeyi ölçerlerdir. Maksimum doğruluk için mikrofon kulağın yakınında gömleğin yakasına ve şapkanın kenarına takılmalıdır.

Doz metreler gürültüyü sürekli olarak ölçerler, 8 saatlik ölçüm sonucunda müsaade edilen maksimum maruz kalmanın yüzdesini gösterirler. Kısa zaman aralıklarında örnek verilerin alınabildiği yerlerde, okunan değer 8 saatlik eşdeğer maruz kalmaya dönüştürülebilir. Doz metrelerin kullanımı, ölçüm süresince aşırı gürültü çıkarılmasını önlemek için idari önlem gerektirir.

Gürültü tekrarlı ise; ki bu genel durumdur, doz metre hızlandırılmış ölçüm modu varsa ölçüm süresi büyük ölçüde azaltılabilir. Günün toplam gürültü dozu birkaç makina çevriminden çıkartılabilir. Bu işlem bir günde birçok çalışma istasyonunun tetkik edilmesini sağlar.

2.10.6 *Darbe Gürültüsü Kriteri*

Darbe gürültüsünden dolayı işitme kaybı riskini değerlendirme kriteri yaygın olarak standartlandırılmamıştır. ISO, ölçülen dBA "S" değerine 10 dB ekleyerek, çekiç ve perçin tabancası gibi bir seri darbe sesleri için kısmi doz yaklaşımı önermektedir, fakat bu yaklaşım, şahmerdan ve hidrolik presler gibi tek darbeleri kapsamaz. Sonuç olarak, çeşitli ülkelerde çok farklı olan ek kriter benimsenmiştir. Bazı ulusal standartlar darbe gürültü limitlerini dBA "I" (Impulse) seviyesi cinsinden empoze etmektedirler.

Darbe gürültüsü için olan değişik maruz kalma kriterleri düzenli olmadığından; maruz kalan personele, işitme koruması programlarının ilk kısımlarında daha fazla önem verilmelidir.

2.10.7 *Darbe Gürültüsünün Ölçülmesi*

Sadece "F" (hızlı) ve "S" (yavaş) zaman aralığı olan ses düzeyi ölçerler, tepkileri çok yavaş olduğundan darbeleri sesleri ölçmeye pek uygun değildir. Bazı ulusal standartlar darbe gürültüleri ölçümlerinde "I" zaman ağırlığı olan ses düzeyi ölçerleri kullanmayı belirtmektedirler. "I" zaman ağırlık moduna ayarlandığında bu ses düzeyi ölçerler "F" zaman ağırlığından dört kat daha hızlı tepki gösterirler. "I" zaman ağırlığı normalde insan kulağının darbe seslere olan gürülük (loudness) tepkisini örneklemek için kullanıldıklarından, işitme hasar riskini belirlemek için uygun zaman ağırlığı değildir.

OSHA; impact gürültüsünü; lineer frekans cevabı, tepe dedektör devresi (peak detection circuit) ve "I" zaman ağırlık tepkisinden yaklaşık bin kat daha hızlı bir tepkiye sahip olan ses düzeyi ölçerler ile ölçüleceğini söylemektedir. Bu özelliklere sahip olan ses düzeyi ölçerler, akustik dalganın tepe değerini fiziksel olarak ölçülmesini sağlar. Tepe dedektörü ile donatılmış ses düzeyi ölçerler böyle ölçümleri yapmak için uygundur. Bu tür ses düzeyi ölçerler, ölçülen en büyük değeri tutar ve sesin sayısal değerini gösterir.

2.11 **Gürültü Değerlendirme Eğrilerinin Kullanımı**

Hemen hemen tüm gürültü azaltma programlarında, özellikle ölçülen dBA değerleri mücadele edilen limitlerin üstünde ise, gürültünün rahatsız edici değerinin belirlenmesi

gerekli olacaktır. Bunun için ilk önce oktav veya 1/3 oktav band frekans analizi elde edilmelidir.

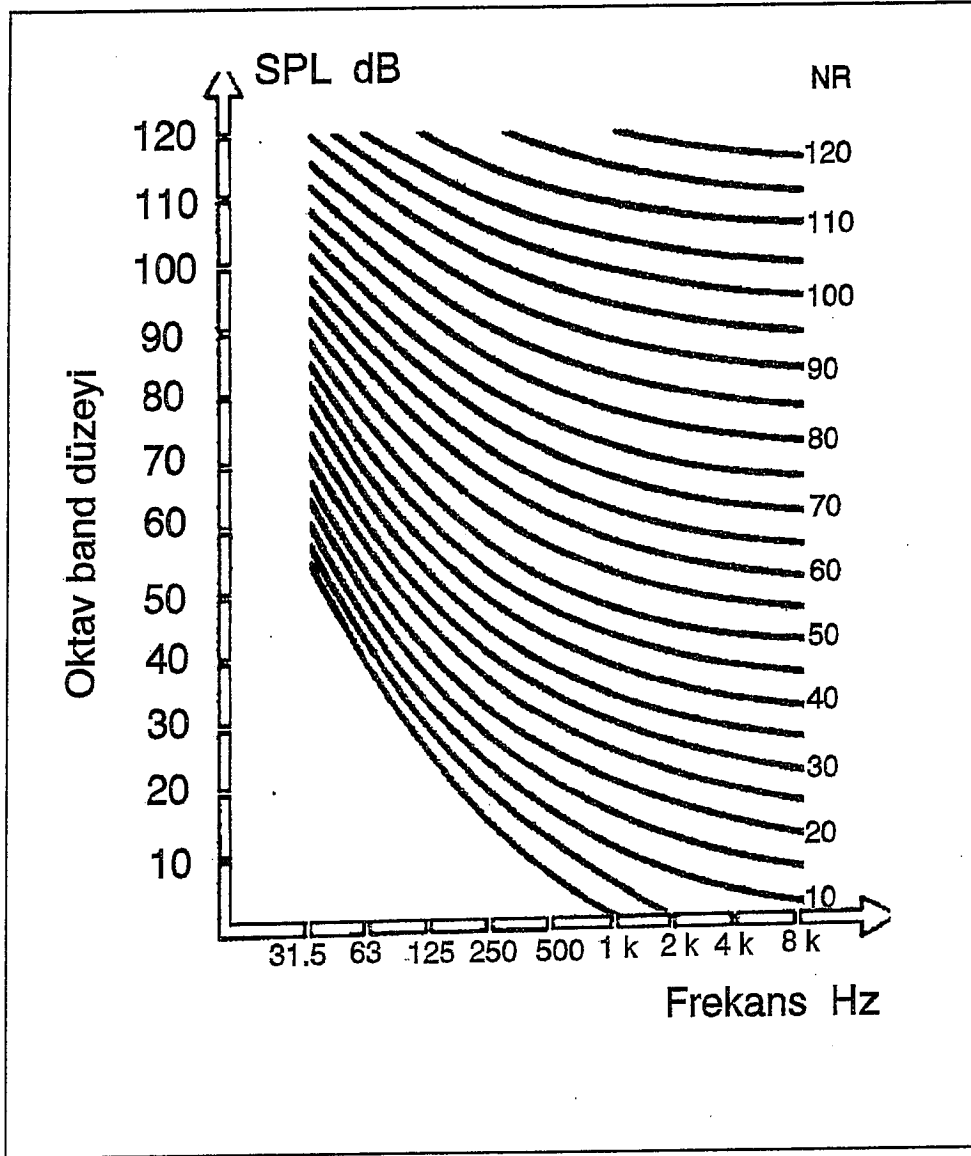
Gürültüden olan rahatsızlık seviyesini belirlemek için birkaç metod (bazısı karmaşık) çeşitli standartlarda tavsiye edilmektedir. Bunlardan en basit olanı Şekil 2.14'de görüldüğü gibi ISOR 1996 standardında verilen Gürültü Değerlendirme Eğrilerini NR (Noise Rating Curves) kullanmaktır. Oktav veya 1/3 oktav band merkez frekanslarında ölçülen ses basınç düzeyleri NR eğrileri üzerinde işaretlenir. NR eğrileri üzerine işaretlenmiş olan spektrogramın hemen üzerindeki eğrinin numarası kolayca görülebilir ve gürültü bu eğrinin numarası ile adlandırılır.

NR eğrilerinin şeklinden kolayca görülebildiği gibi yüksek frekanslara düşük frekanslardan daha çok önem verilmektedir. Bunun nedeni, yüksek frekansların düşük frekanslı seslerden daha çok rahatsız edici olmasındandır. Bazı ülkelerde, işçilerin gürültüye maruz kaldığı süreyi maksimum yapabilmek için NR eğrilerine benzer eğriler kullanılmaktadırlar.

Akustik ölçümlerde tercih edilen frekanslar Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu frekanslar verilen oktav band geçiren filtrenin merkez frekansıdır. f_1 ve f_2 frekansından oluşan bir bandın merkez frekansının hesaplanması (geometrik ortalama), daha önce Bölüm 1.10'da anlatılmıştır. Bir sesin frekans karakteristiği hakkında daha detaylı bilgi elde edilmek istendiğinde ölçümlerde kullanılan filtreler 1/12 veya 1/24 oktav olarak seçilebilir.

2.12 NC Eğrileri

NC (Noise Criteria) eğrileri kırık çizgilerden oluşan, kullanılışı genellikle Amerika'da yaygın olan eğrilerdir [7]. Şekil 6'da sekiz oktav bantta kabul edilebilecek fon gürültü

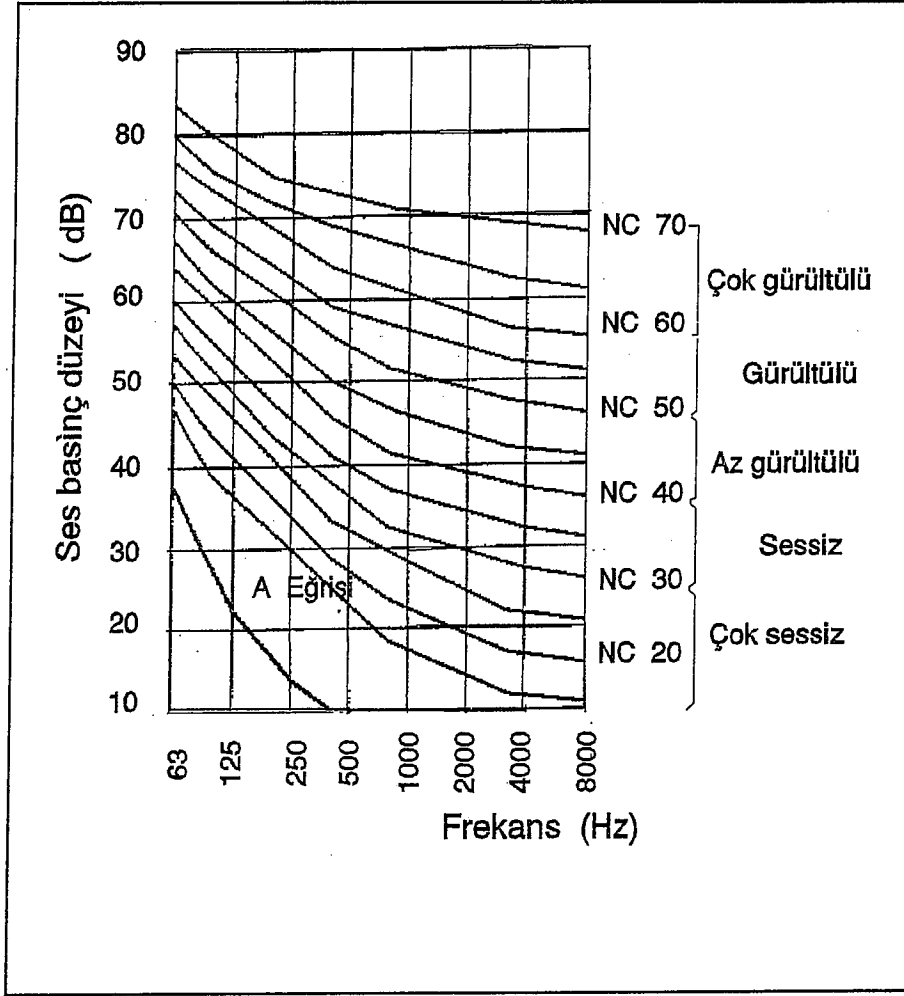


Şekil 2.12 Gürültü değerlendirme eğrileri

düzeyleri gösterilmiştir. Bu eğriler, hacimleri fon gürültüsü yönünden çok sessizden çok gürültülü'ye kadar beş bölümde tanımlamaktadır. Şekil 2.13'deki kalın çizgi ile gösterilen A eğrisi sürekli gürültüler için işitme alt eşiğini belirtmektedir. Fon gürültüsü olarak NC eğrilerinin kullanılması durumunda, değişik hacimler için önerilen fon gürültüsü düzeylerinden yararlanılır. Çizelge II ve II'de "NC" değerleri "dB" olarak verilmiştir.

Çizelge 2.5 Değişik Hacimler İçin "NC" Değerleri

HACİMLER	NC (dB)
Konser Salonu	15 - 20
Radyo Kayıt Stüdyosu	15 - 20
Opera	20
Mahkeme Salonu	20 - 25
Televizyon Stüdyosu	20 - 25
Bürolar (İdareci)	20 - 30
Derslikler	25
Film Stüdyosu	25
Konferans Salonu	25 - 30
Tapınaklar	25 - 35
Toplantı Salonu Okul Oditoryumu	25 - 35
Otel, Motel	30
Sinema Salonu	30
Hastane	30
Bürolar (Özel)	30 - 35
Okuma Salonu	30 - 35
Bürolar (İş Merkezi)	35 - 45
Lokantalar	35 - 50
Çizim Atelyeleri	40 - 45
Spor Salonu	45 - 50
Bürolar (Yazı, Hesap Makinaları)	45 - 60



Şekil 2.13 NC Eğrileri

3

EMİSYON

ÖLÇÜMLERİNE GİRİŞ

3	EMİSYON ÖLÇÜMLERİNE GİRİŞ	3.5
3.1	Giriş	3.5
3.2	Ses Ölçüm Dönüştürücüleri	3.6
3.2.1	Dinamik Mikrofonlar	3.6
3.2.2	Şerit (Ribbon) Mikrofonlar	3.6
3.2.3	Seramik Dönüştürücüler	3.7
3.2.4	Manyetostriktif Dönüştürücüler	3.8
3.2.5	Sıcak-Tel (Hot-wire) Probları	3.8
3.2.6	Piezoreziztif Elemanlar	3.9
3.2.7	Karbon Mikrofonlar	3.9
3.2.8	Kapasitif (Condenser) Mikrofonlar	3.10
3.3	Ses Gücünün Ölçümü	3.12
3.3.1	Ses Güç Ölçümlerinde Temel Yaklaşımlar	3.13
3.3.2	Ses Basınç Düzeyi ile Ses Gücü Ölçümü	3.15
3.3.2.1	Ses Güç Düzeyi Ölçümü İçin Gerekli Teçhizat	3.15
3.3.3	Test Ortamı	3.16
3.3.4	Test Odasının Boyutu	3.17
3.3.5	Test Odasının Yutuculuğu	3.17
3.3.6	İstenmeyen Yansımalar	3.18
3.3.7	Diğer Faktörler	3.18

3.3.8	Ölçüm Yüzeyi	3.19
3.3.9	Mikrofon Konumu ve Yönü	3.20
3.3.10	Techizat Konfigürasyonu ve Ayarları	3.22
3.3.11	Ölçüm Prosedürü	3.23
3.3.11.1	Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu	3.23
3.3.11.2	Geriplan Gürültüsü Ölçümü	3.24
3.3.11.3	SPL Aralığının Kontrolü	3.24
3.3.11.4	Ses Gücü Hesabında Kullanılan SPL Ölçümleri	3.24
3.3.11.5	Kullanıcı Konumunda Ölçüm	3.25
3.3.11.6	Düzeltilmiş SPL ve Ses Gücünün Hesaplanması	3.25
3.3.11.7	Ölçüm Raporu	3.26
3.4	Ses Şiddeti Ölçerek Ses Gücünün Hesaplanması	3.27
3.4.1	Gürültülü Ortamda Ses Gücü Ölçümü	3.28
3.4.2	Ses Şiddetinin Ölçülmesi	3.28
3.4.2.1	Bir Yöndeki Hızın Ölçülmesi	3.30
3.4.2.2	Basınç Farkının Hıza Dönüştürülmesi	3.30
3.4.3	İki Mikrofonlu Ses Şiddet Probu	3.33
3.4.4	Ölçümdeki Hata Kaynakları	3.34
3.4.4.1	Yüksek Frekans Hataları	3.34
3.4.4.2	Düşük Frekans Hatası	3.35
3.4.4.3	Artık (Residual) Şiddet	3.37
3.4.5	Ses Şiddeti Kullanarak Ses Gücünün Belirlenmesi	3.38

3.4.5.1	Uygun Frekans Bölgesinin Seçilmesi	3.38
3.4.5.2	Ses Şiddet Probonun Konfigürasyonu	3.39
3.4.5.3	Test Ortamı	3.42
3.4.5.4	Ölçüm Yüzeyi	3.43
3.4.5.5	Alan Kalibrasyonu	3.43
3.4.5.6	Alan Kontrolü	3.44
3.4.5.7	Yüzey Üzerinde Şiddet Ölçümü	3.44
3.4.5.8	Yüzey Ses Şiddet Düzeyinin Hesaplanması	3.45
3.4.5.9	Ses Güç Düzeyinin Hesaplanması	3.46
3.4.5.10	Test Raporu	3.47

3.1

Giriş

Akustik gürültü standartları ve düzenlemeler, iki nedenden dolayı önemli rol oynar. Çalışma ortamındaki ergonometriler hızla düzenlenmekte, ihraç ve ithal lisansları özel akustik ölçüm standartları ile uyum gerektireceğinden, rekabet karşılaştırmasında yeni kıstaslar sağlamaktadır. Ses güç düzeyi, tutarlı, kıyaslanabilir ve gürültü kontrol mühendisliğinde çok kullanışlı olduğundan, ses basınç düzey ölçümlerine tercih edilir.

Ses basınç ölçümleri (SPL) insan işitme tepkisinin en iyi göstergesidir. Ancak SPL ölçümleri akustik çevreye bağlıdır. Test odası mükemmel yutucu (yansız oda - anechoic chamber) ya da mükemmel yansıtıcı (yansıtıcı oda - reverberant room) olmadıkça herhangi bir SPL ölçümü, odanın karakteristiğine bağlı olacaktır. Duvar ve zeminin yutuculuğu, odanın geometrisi ve hacmi, yansımalar, duran dalgalar SPL ölçümlerini etkileyen faktörlerdir. Örneğin, yansız odada küçük bir fanın hava girişinden 1 m uzakta 75 dB'lik bir SPL ölçülebilir. Bu ölçüm, sert duvarlı bir odada tekrarlandığında 79 dB ölçülebilir. Ölçümler arasındaki bu fark, farklı fanların karşılaştırmasını daha az güvenli yapar. Uygun bir yansız odada tüm fanları hava girişlerinden 1 m uzaklıkta ölçmek alternatif teknik olabilir. Fakat diğer yönlerde de yayılım yapan diğer gürültü kaynaklarının, yön bağımlılıkları hesaba katılmalıdır. Bu tür yön bağımlılıkları, toplam ses gücü ölçümlerinde hesaba katılır.

Toplam ses gücü verilen bir kaynaktan belli bir mesafede SPL'i ve dolayısıyla gürültü seviyesini kısıtlayacak gürültü yutulmasını hesaplamak mümkün olduğundan, ses gücü, gürültü azaltması için kullanışlı bir tekniktir.

3.2 Ses Ölçüm Dönüştürücüleri

Gaz, sıvı ve katı ortamlardaki sesi ölçmek için çeşitli dönüştürücüler (transdüser) mevcuttur [8]. Bu dönüştürücülerin çoğu ses basıncını ölçerler. Birkaçı doğrudan parçacık hızıyla orantılı olan basınç gradyenini ölçer. Bu bölümde mevcut olan ses ölçüm dönüştürücülerinin genel karakteristiklerinden bahsedilecektir.

3.2.1 *Dinamik Mikrofonlar*

Dinamik mikrofonlar havadaki sese karşı duyarlıdırlar. Dinamik mikrofonların kullanım alanları, radyo yayın endüstrisi ve ses güçlendirme sistemleridir. Basınca duyarlı diyaframın hareketi, manyetik alan içine konulmuş olan bobine aktarılır. Diyafram olarak kullanılan malzeme alüminyum alaşımları, bakalit veya plastiktir. Dinamik mikrofonlar 0 - 100 dB re 20 μ Pa arasındaki ses basınç düzeylerini ölçmek için kullanılırlar. İyi bir dinamik mikrofonun frekans cevabı 50 Hz'den 12 000 Hz'e kadar uzanır. Frekans bölgesinin genişlemesi için bir ya da birden fazla akustik rezonans devresi vardır. Aşırı sıcaklık dalgalanmaları olduğunda mikrofondaki bu rezonans sistemlerinin kontrolü zordur. Bu nedenle, dinamik mikrofonlar en düzgün frekans cevaplarını oda sıcaklığında verirler.

Dinamik mikrofonlar aynı zamanda elektromanyetik alanlardan kaynaklanan gürültülere karşı çok duyarlıdırlar. Bu nedenle büyük transformatörler ve diğer elektrikli aletlerin varlığında dikkatli kullanılmalıdır. Dinamik mikrofonların çıkışları düşük empedanslı olduğundan uzun kablo ile çalışma imkanı sağlanır.

3.2.2 *Şerit (Ribbon) Mikrofonlar*

mikrofonlardır. Prensip olarak yayıncılıkta kullanırlar. Parçacık hızının yönü ve büyüklüğünü belirlemek gibi bazı özel amaçlı akustik ölçümler için kullanılırlar.

Bu mikrofon iki manyetik kutup arasındaki havaya gevşek gerilerek asılmış bir şeritten oluşur. Hava aralığına akış sağlamaya ilave olarak, kutup parçaları, şeridin iki tarafında basınç gradyeni olmasını sağlayan, akustik engel olarak çalışırlar. Ses dalgasının etkisi altında, her iki taraf arasındaki basınç nedeniyle şerit denge konumundan hareket eder. Manyetik alan içerisinde şeridin hareketi, şerit üzerinde bir voltaj indükler. Oluşan voltaj yükseltece aktarılır. Şerit mikrofonların elektriksel çıkışı belli şartlar altında parçacık hızıyla ilişkili olan basınç-gradyeni ile orantılıdır. Bu nedenle şerit mikrofonu hız mikrofonu olarak adlandırılır.

Dinamik mikrofönlar gibi şerit mikrofonlar da düşük empedanslı ses dönüştürücüleridir. Fakat şerit mikrofonlar dinamik mikrofonlara göre daha kırılganırlar.

3.2.3 *Seramik Dönüştürücüler*

Seramik mikrofonlar, dinamik mikrofonun cevap karakteristiklerine benzer olup sağlam ve ucuzdırlar. Sürücü eleman piezoelektrik kristalden yapılmıştır. Mikrofondaki bu kristal bir diyafram tarafından ya da doğrudan uyarılır.

Diyafram-uyarmalı seramik mikrofonlarda ses basıncı, piezoelektrik seramik elemanı süren diyafram üzerine etkir. Diyafram-uyarmalı elemanın çıkışı, bu elemanın düşük empedanslı hava ve yüksek empedanslı seramik arasında uyumlaştırmacı gibi çalışmasından dolayı doğrudan uyarımlı elemanların çıkışından hayli yüksektir.

Seramik mikrofonların ilk modellerinde quartz, Rochella tuzu kristalleri kullanılıyordu.

Bu kristallerde boyut ve şekil verme kısıtlaması vardı. Baryum titanatın bulunmasıyla bu sorun ortadan kalkmış oldu. Baryum titanat ya da kurşun çinko titanat, mikrofonlarda duyurga elemanı olarak, silindir, halka ve disk şeklinde bulunmaktadır.

Doğrudan-uyarımlı seramik dönüştürücüler sualtı akustiğinde ve ayrıca havadaki yüksek şiddetli seslerin ölçümüne kullanılmaktadır. Seramik hidrofonlar ya da mikrofonlar, akustik hassasiyetlerine bakılmaksızın yaklaşık olarak titreşime aynı oranda hassastırlar. Ancak bazı seramik mikrofonlarda titreşim önleme özelliği bulunmaktadır.

3.2.4 *Manyetostriktif Dönüştürücüler*

Bu dönüştürücüler çok geniş olarak sualtı akustiği ve sanayide ultrasonik uygulamalarda kullanılmaktadır. Manyetostriktif dönüştürücüler genelde ses alıcı ve verici olarak kullanılmaktadırlar. Bu dönüştürücüler doğal rezonans frekanslarında çalışmaktadır ve 1/3 oktavda ya da daha küçük etkin bir band genişliğine sahiptirler, bu nedenle ses ölçüm hidrofon ya da mikrofonu olarak kullanıldığında, manyetostriktif dönüştürücüler özel amaçlı cihaz olarak ele alınmalıdır. Bu dönüştürücülerin başlıca avantajları düşük empedanslı ve sağlam oluşlarıdır.

3.2.5 *Sıcak-Tel (Hot-wire) Probları*

Sıcak-tel probu, yoğun ses alanlarındaki çalışmaları için kullanılır. Yüksek sıcaklık katsayısına sahip olan çok iyi bir telden yapılır. Probdaki tel, daima nikel ya da platindir. Telin çapı 1 μ m ile 0,1 mm arasında değişebilir. Sıcak-tel probu maksimum cevabını akış tele dik olduğunda verir. Bir elektrik akımıyla ısıtıldığında sıcak-tel probu parçacık hızını doğrudan ölçecektir. Sıcak-tel probu 0 - 10 000 Hz' lik frekans bandı

üzerindeki yoğun ses alanlarını ölçebilir. Bazı araştırmacılar bu frekans bandını 100 kHz'e kadar genişletmişlerdir.

3.2.6 *Piezorezistif Elemanlar*

Yeni kuşak ses düzeyi ölçen dönüştürücüler için piezorezistif elemanlar büyük bir potansiyele sahiptirler. Titreşim ölçümlerindeki piezorezistif dönüştürücülerinin dizaynı ve imalindeki yakın gelişmeler, sonik patlamalar gibi aşırı yüksek şiddetli ses ölçümleri için mikrofon dizaynına imkan tanıyabilir.

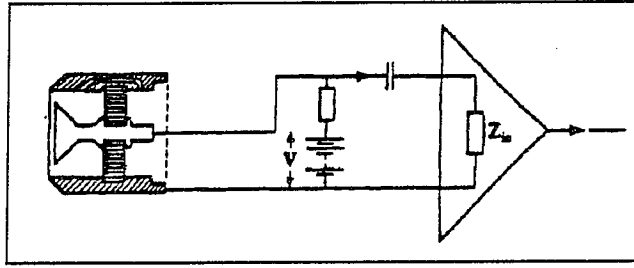
Piezoelektrik ve piezorezistif eleman arasındaki genel karakteristiklerin asıl farkı piezorezistif cihazın bir elektriksel uyarmaya ihtiyaç duymasıdır. Elemana uygulanan mekanik giriş, elektriksel uyarmayı module ederek ölçülebilen bir sinyal üretir. Piezorezistif elemanlar düşük çıkış empedansları ve 0 Hz'e karşı gösterdikleri tepki ile karakterize edilirler.

3.2.7 *Karbon Mikrofonlar*

Karbon mikrofonu radyo ve televizyon endüstrisinde yaygın olarak kullanılan mikrofon tipidir. Bu tip mikrofonlar yüksek elektriksel çıkış, aşırı dayanıklılık ve düşük fiyat gibi özelliklere sahiptir. İçi karbon granülleri ile doldurulmuş kapalı hacim bir (carbon button) vardır. Kapalı hacime bağlı olan diyaframa etkiyen ses dalgasının etkisi ile granüller arası elektriksel direnç değişmektedir. Bu nedenle toplam hacmin elektriksel direnci (genellikle 100 Ω) değişir. Direncin değişimi lineer olarak diyaframa uygulanan ses basınç düzeyi ile orantılıdır. Karbon mikrofonlarının çalışma prensibi bu olaya dayanır.

3.2.8 Kapasitif (Condenser) Mikrofonlar

Kapasitif mikrofonlar havadaki ses basıncına karşı duyarlıdırlar. Bu mikrofonların prensip olarak kullanım alanları; ölçüm, kayıt ve radyo yayıncılığıdır. Kapasitif mikrofondaki basınç algılama elemanı ince, gerilmiş metal diyafram veya sıkıştırılmış ince metaldir. Diyafram malzemesi nikel, alüminyum, paslanmaz çelik, plastik veya cam olabilir. Malzeme olarak plastik veya cam seçilmiş ise diyafram üzerine iletken malzeme kaplanmalıdır. Diyafram ile arkaplaka (backplate) arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0,025 mm dir. Bu aralık, kapasite prensibinin çalışması için yeterlidir.



Şekil 3.1 Kapasitif mikrofonun basitleştirilmiş hali

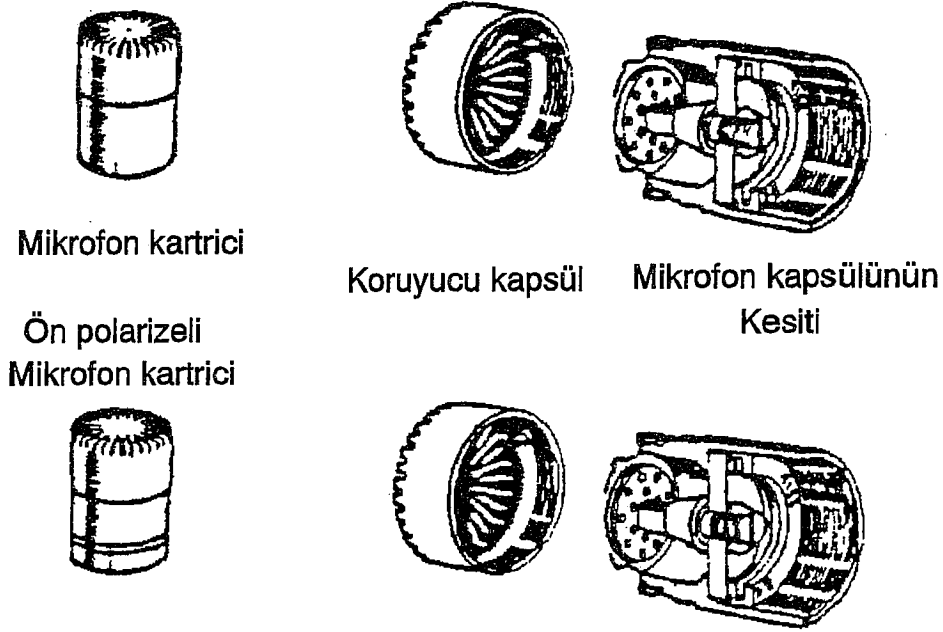
İki levhadan oluşan bir kondansatör için kapasite ifadesi

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3.1)$$

ile verilir. Burada C kapasite, ϵ ortamın dielektrik sabiti, A levhanın yüzey alanı, d ise iki metal levha arasındaki mesafedir. Kapasite, iki levha arasındaki mesafe ile ters orantılı olduğundan, bu mesafe küçük tutulmalıdır. Arkaplakaya bir DC voltaj uygulandığında, ses basıncındaki değişimden dolayı kapasitedeki değişim çıkışta bir değişime neden olacaktır. Bir kondansatörde oluşan yük ile uygulanan voltaj arasında $V = Q / C$ şeklinde bir bağıntı vardır. Kapasitedeki değişim voltaj üzerinde aşağıdaki gibi bir değişime yol açar.

$$\Delta V = Q \frac{\Delta C}{C^2} = Q \frac{\Delta d}{\epsilon A} \quad (3.2)$$

Mikrofonun diyaframı elektriksel olarak topraklanmıştır. Oluşan sinyal arkaplakadan alınmaktadır. Kapasitif mikrofonun diyaframı 2,5 - 25 mm çapında olabilir. Kapasitif mikrofonlar, yüksek hassasiyet, düşük distorsiyon, çok düşük iç gürültü ve düzgün frekans cevabından dolayı çok kullanışlı, genel amaçlı mikrofonlardır. Sıcaklık ve zamana bağlı olarak çok kararlıdır. Doğal olarak kapasitif mikrofonlar aşırı titreşime diğer ses ölçüm dönüştürücülerinden daha az duyarlıdır.



Şekil 3.2 Kapasitif mikrofon kartırcıları

3.3

Ses Gücünün Ölçümü

Akustik ses gücü doğrudan ölçülemez, ancak ölçülecek kaynağı kaplayan yüzey üzerindeki şiddet ölçümlerinden türetilir. Ses şiddet birimi W/m^2 olduğundan toplam ses gücü, tüm yüzey üzerinde ölçülen ortalama ses şiddeti ile yüzey alanını çarparak elde edilir.

$$W_t = I A_s \quad (3.3)$$

I : Yüzey üzerindeki ortalama ses şiddeti

A_s : Kaynağı saran yüzeyin toplam alanı

Ses şiddetini dolayısıyla ses gücünü ölçmek için iki temel teknik kullanılır. Birinci teknikte ses şiddetini doğrudan ölçmek için ses şiddeti probu ve analizörü kullanılır. İkinci teknikte ise yansız oda gibi özel akustik çevrede ses basınç düzeyi ölçümleri yapılır. Ses basınç düzeyini ölçmek için ise mikrofon ve 1/3 oktav analizörü kullanılır. Ölçüm prosedürü her iki ölçüm tekniği için hemen hemen aynıdır. Ölçüm prosedürleri ilerki kısımlarda detaylı olarak anlatılacaktır. Bu prosedür aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Test şartlarını sağlayan bir tesis seçilir; basınç ölçümleri için yarı yansız oda, veya şiddet ölçümleri için bir konferans salonu gibi sessiz bir yer.
- Ölçülecek kaynak, akustik olarak rijit olan bir yerin üstüne konulur.
- Kaynağı saracak şekilde, genellikle kutu şeklinde olan bir ölçüm yüzeyi tanımlanır. Bu yüzey üzerinde ölçüm noktaları belirlenir.
- Mikrofon ve ölçüm sistemi, ölçme ortamının kabul edilebilirliği kontrol edilir (P-I).
- Herbir ölçme konumunda basınç veya şiddet ölçülür.
- Ölçme konumlarının yeterli olup olmadığı kontrol edilir.
- Toplam ses güç düzeyi hesaplanır.
- Sonuçlar dökümanite edilir.

Makinaların ve ekipmanların ses güç düzeylerini belirlemek için çeşitli uluslararası standartlar vardır. Çizelge 3.1'de bu standartların kısaca özeti bulunmaktadır. Aşağıdaki çizelgede bulunan ISO 3744 ve 3745 standartlarında kapsanan temel test prosedürleri burada anlatılacaktır. Bu standartlar, ses gücü ölçümünde kullanılan test standartları ile aynıdır. Örneğin ISO 7779, bürolarda kullanılan çeşitli makinaların ses gücü ölçümleri için kullanılan bir standarttır. ISO 3744 ve 3745 standartına dayalı olup ses gücüne ilave olarak kullanıcı ve bekleme konumlarında ve bilhassa darbe ve safton gibi özel ses basınç ölçümlerini de kapsamaktadır.

3.3.1 Ses Güç Ölçümlerinde Temel Yaklaşımlar

İlerleyen düzlem dalgaların serbestçe yayıldığı serbest alan ortamında şiddet ve basınç arasındaki ilişkinin

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

olduğunu belirtmiştik. Bu ifadede ρc havanın akustik empedansı olup 1013 mbar'da ve 20 °C'de 415 N/m²'ye eşittir. Tesadüfi olarak serbest alanda şiddet düzeyi ve ses basınç düzeyi yaklaşık olarak eşittir.

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \quad (3.4)$$

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad p_0 = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa} \quad (3.5)$$

$L_p - L_I$: Basınç-Şiddet seviye farkı olmak üzere

$$L_p - L_I = 10 \log \left[\frac{p^2}{(20 \times 10^{-6})^2} \right] - 10 \log \left[\frac{p^2 / 415}{10^{-12}} \right] = 0,16 \text{ dB}$$

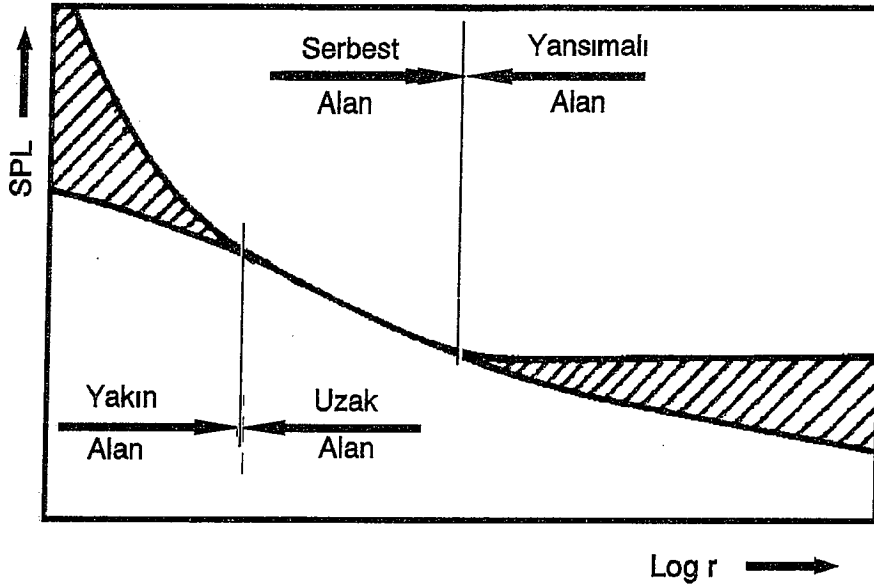
0,16 dB'lik fark, ortam sıcaklığı ve basıncına bağlı olan havanın empedansı ile değişir.

Çizelge 3.1 Ses güç ölçümlerinde kullanılan uluslararası standartlar

Standard No	Metodun Sınıfı	Test Ortamı	Kaynağın Hacmi	Gürültünün Karakteri	Ede edilen ses güç düzeyleri	Ede edilebilen diğer bilgiler
3741	Hassas	Şartları sağlayan reverberasyon odası	Tercihen test odası hacminin % 1 den küçük	Kararlı, geniş-band	1 - 1/3 oktav bandlarında	A-ağırlıklı ses güç düzeyi
3742				Kararlı, kesikli frekans veya darband		
3743	Mühendislik	Özel, yansımali oda	En büyük boyut < 15 m	Kararlı, geniş-band dar-band, kesikli frekans	A-ağırlıklı ve Oktav bandlarında	Diğer ağırlıklarda ses güç düzeyi
3744	Mühendislik	Diş alan veya geniş oda		Herhangi bir	A-ağırlıklı ve 1 - 1/3 oktav bandlarında	Yönelim bilgisi ve zamana bağlı SPL
3745	Hassas	Yansımali veya Yarı-Yansımali oda	Tercihen test odası hacminin % 0,5 den küçük	Herhangi bir		diğer ağırlıklı ses güç düzeyleri
3746	Araştırma	Özel oda gerekmez	Sadece mevcut odanın getirdiği kısıtlamalar	Kararlı, geniş-band dar-band, kesikli frekans	A-ağırlıklı	Zamana bağlı SPL diğer ağırlıklı ses güç düzeyleri

$\rho c = 400 \text{ N/m}^2$ olduğunda $L_p = L_i$ eşitliği sağlanır.

$L_p - L_i$ niceliği Basınç-Şiddet indeksi (Pressure-Intensity Index **P-I**) olarak adlandırılır. Bu indeks ses alanı tanımlandığı için ses şiddeti ölçümlerinde genellikle kullanılır. Düşük P-I, ortamın aktif ya da yaklaşık serbest alan olduğu anlamındadır. P-I'nın büyük oluşu, basıncın bir kısmının reaktif ses alanından kaynaklandığını gösterir. Aktif ses alanı, ses dalgalarının ortamda serbestçe yayılabildiği alan, reaktif alan ise ses dalgalarının kaynağa yakın olduğu ve net bir dalga akışının olmadığı alandır.



Şekil 3.3 Ses alanlarının uzaklık bağımlılığı

3.3.2 Ses Basınç Düzeyi ile Ses Gücü Ölçümü

3.3.2.1 Ses Güç Düzeyi Ölçümü İçin Gerekli Teçhizat

Ses basıncını kullanarak ses güç düzeylerini belirlemede kullanılan teçhizat yeterli doğrulukta ölçüm yapmalıdır. Tipik gereksinimler şöyle sıralanabilir:

- ANSI S1.11-1986 standardını sağlayan gerçek zaman 1/3 oktav analizörü. Bu standard genlik doğruluğu, band geçirmediği gürültü toleransı, 1/3 oktav filtrenin şekli, eşdeğer ses gücündeki tolerans ve 1/3 oktav filtrenin yapımında önemli olan diğer faktörleri tanımlamaktadır. 1-D tip filtre gereksinimlerini sağlayan bir analizör ses güç ölçümleri için tutarlı ve doğru sonuç verir.

- ANSI S1.4 veya IEC 651 standardını sağlayan dijital veya analog A ağırlık filtreleri; A-ağırlıklı olarak ses gücünü ölçmekte kullanılırlar.

Geçmişte, bu ölçümlerin herbiri farklı analog analizör ile yapılırdı. Hassas darbe ses düzeyi ölçer tüm seviyeleri, gerçek zaman 1/3 oktav analizör 1/3 oktavda SPL'i, FFT (Fast fourier transform) spektrum analizör saftan ses ölçümleri için kullanılıyordu. Şimdi ise, tüm gerekli ölçümleri; üzerindeki farklı ölçüm modlarını basitçe seçerek yapabilen birkaç gerçek zaman dijital sinyal donanımı ve algoritmalarının kullanılmalarıyla mümkündür.

Çoğu modern dijital analizörler benzer bir proses kullanılır. Analizöre gelen sinyal analog - dizital dönüştürücüleri kullanılarak dijital hale getirilir. Gerçek zamanda 1/3 oktav filtrelemek için örneklenen sinyal, dijital Butterworth filtrelerinden geçirilir ve her bir 1/3 oktav band lineer veya üstel ortalama yolunu metodunu kullanarak toplanır. Darbe dedeksiyonu için dijital bilgi (gerekli olan 35 ms'lik hızlı ölçme zaman sabitine ve 1.5 s'lik yavaş azalma zaman sabitine sahip olan) dijital darbe dedektörüne gönderilir. Tüm seviyeler için dijital örnekler halindeki enerji, belirlenen band genişleyici üzerinden toplanır. Son olarak FFT analizi için, uygulanan pencerede örnek bloklar halinde FFT işlemcilerle gönderilir.

3.3.3. *Test Ortamı*

ISO 3745 standardını sağlayan ses basınç ölçümlerini kullanarak ses gücünü

ölçmedeki temel yaklaşımları garanti etmek için testler yarı yansız odada yapılır. Yarı yansız oda tabanı sert yansıtıcı bir zeminden oluşan bir odadır. Odanın içinde yansıtıcı nesne ve yüzeyler olmamalıdır.

3.3.4 Test Odasının Boyutu

Test odası, ölçüm yüzeyinin yakın olan etkilerinin dışında, serbest alan içinde olacak kadar büyük olmalıdır. Yakın olan ortamının boyutu akustik dalga boyuna bağlı olduğundan test odasının şekli, hacmi ve ölçüm yüzeyinin boyutu, düşük frekans en uzun dalga boyuna sahip olduğundan ihtiyaç duyulan en düşük frekans ölçümü tarafından belirlenir. Gürültü kaynağı ile ölçüm yüzeyi arasındaki ölçüm mesafesini belirlemek asıl kurallardan biri uzak olanın, gürültü kaynağının en büyük boyutunun iki katı uzunluğundaki bir mesafeden başlıyor olmasıdır. Örneğin, 50 cm'lik maksimum boyuta sahip olan bir yazıcı için ölçüm mesafesi en az 1 m olmalıdır.

Test odasının duvarları, ölçüm yüzeyine çok yakın olmamalıdır. Mesafe en azından, ihtiyaç duyulan en küçük 1/3 oktav bandının merkez frekansının karşılık gelen sesin dalga boyunun dörtte biri olmalıdır ($\lambda/4$). Bu nedenle 1/3 oktav 100 Hz'e kadar olan frekanslarda doğru ölçüm yapmak için ölçüm yüzeyi ile test odasının duvarlarındaki yutucular arasındaki minimum mesafe

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{344 \text{ m/s}}{4 \cdot 100 \text{ 1/s}} = 0.86 \text{ m}$$

olmalıdır.

3.3.5 Test Odasının Yutuculuğu

Test odası, yansıtıcı bir yüzey üzerinde yansız odayı simüle eden yarı-yansız

üzerinde olduğundan; ilgili frekans test odasının tavanı ve duvarları % 100, tabanı ise % 0 katsayısına sahip olmalıdır.

Düzlem dalga empedans tüpünde ölçüldüğünde pratik ölçümler duvarlar ve tavanın yutma katsayısının % 99'dan büyük ve taban yutuculuğunun % 6'dan az olduğunu tayin eder.

Test odasının duvarları, normalde arkalarında az bir boşluk kalacak şekilde ses yutucu malzemeleri ile kaplanır. Bu kaplamanın hava boşluğunu da içeren toplam uzunluğu, yine aynı ilgi duyulan en düşük 1/3 oktav merkez frekansına karşılık gelen dalgaboyunun dörtte birine eşittir. 100 Hz'lik 1/3 oktav bandı için bu mesafe 0.86'lik malzeme ve hava boşluğu mesafesine eşittir.

3.3.6 *İstenmeyen Yansımalar*

Havalandırma, borular ve kablo gibi sese maruz kalan nesnelerden yansımalar oluşabilir. Ölçüm hatasını azaltmak için tüm bu yansıtıcı yüzeyler, yansıtmasız odanın duvarları dışında olmalıdır.

3.3.7 *Diğer Faktörler*

Yansıtmasız oda dizaynında önemli rol oynayan diğer faktörler:

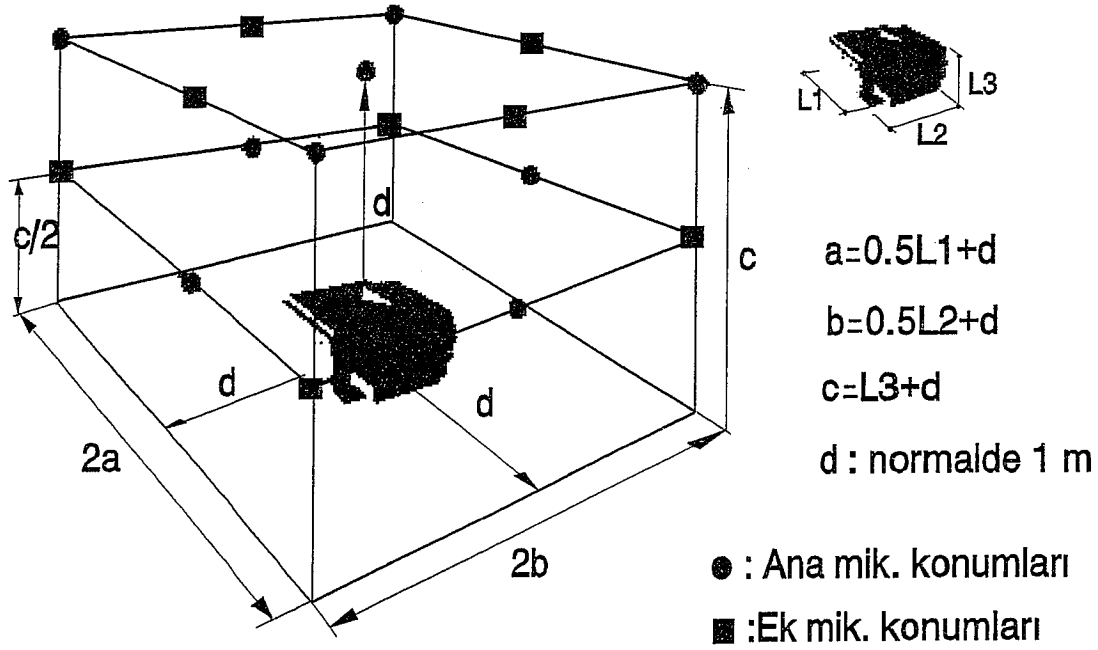
- Havalandırma ve şartlandırma gürültüsü
- Yerel trafikten kaynaklanan gürültü ve titreşim
- Tesis içinden kaynaklanan geriplan gürültüsü

olarak sıralanabilir. Bu faktörler doğruluğu azaltabilir ya da uygun olarak dizayn

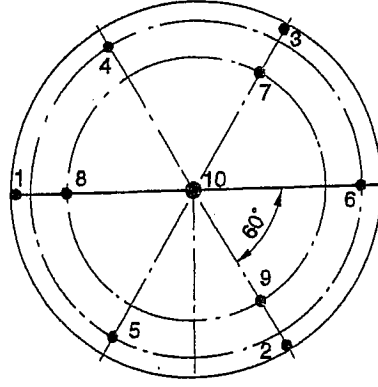
edilmemiş olan yansımaz odanın kullanışlı frekans bölgesini kısıtlayabilir.

3.3.8 Ölçüm Yüzeyi

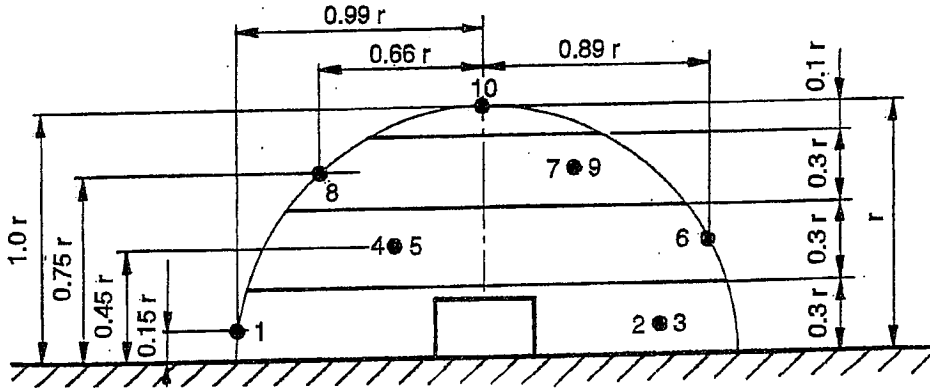
Ses gücü belirlemesinde standard ölçüm yüzeyi, sert yansıtıcı yüzey üzerinde olan dikdörtgen prizma şeklindeki kutudur. Daha önce bahsedildiği gibi ölçüm yüzeyi mümkün olduğu kadar yakın alanın dışında ancak mümkün olduğu kadar da kaynağa yakın olmalıdır. Ölçüm mesafesi olarak adlandırılan bu mesafe normalde 1 m'dir. Mikrofonlar Şekil 3.4'de görüldüğü gibi uygun aralıklarda yerleştirilir. Küçük gürültü kaynakları için Şekil 3.5'de görülen yarı küre kullanılması daha uygundur.



Şekil 3.4 Dikdörtgen prizma şeklindeki ölçüm yüzeyi



Şekil 3.5 Yarım küre şeklindeki ölçüm yüzeyi

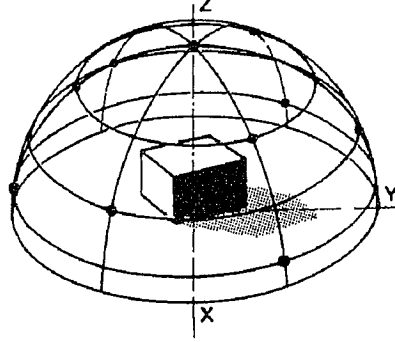


Şekil 3.6 Yarıküre yüzey üzerindeki ölçüm noktalarının konumları

3.3.9 Mikrofon Konumu ve Yönü

Şekil 3.4'de görülen dikdörtgen prizma yüzey için en az dokuz mikrofon konumu gereklidir. Eğer gürültü kaynağı uzun ya da oldukça yön bağımlılığı varsa ek mikrofon

Ses gücü ölçümünde kullanılan hayali küre

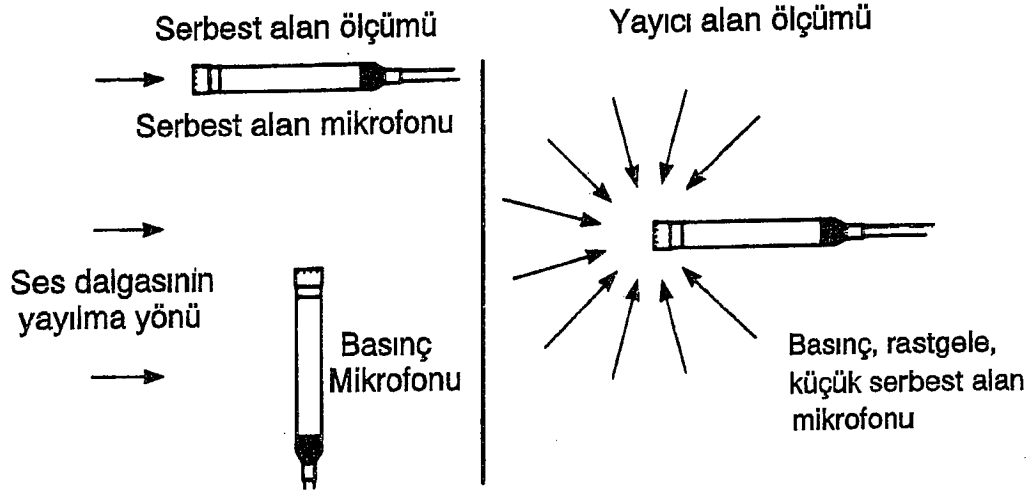


Şekil 3.7 Ölçüm yüzeyinin üç boyutlu görünüşü

konumları gerekebilir. Daha fazla mikrofonun gerekip gerekmediğini kontrol etmek için iki yöntem vardır:

Birincisi, ölçülen minimum ve maksimum SPL arasındaki farkın mikrofon konum sayısından az olmasıdır. Dokuz mikrofon için ölçülen SPL bölgesi 9 dB'yi geçmemelidir. Bu durum ISO 3745 (1977E) standardında ise; ölçülen maksimum ve minimum SPL arasındaki farkın, mikrofon konumlarının yarısından az olması şeklinde belirtilmiştir. Eğer fark mikrofon konumlarının sayısından büyük ise Şekil 3.5'deki şekli 180° döndürerek elde edilen yeni 10 noktada da ölçüm yapılmalıdır. Eğer gürültü kaynağı uzun ise, yeni ölçüm yüzeyinin bir uzunluğu ölçüm mesafesinin iki katı uzunluğunda ise Şekil 3.4'de görülen ek mikrofon konumlarında ölçüm yapılmalıdır.

Yarı yansımaz oda içindeki ortam serbest alan olduğundan SPL ölçümleri için serbest alan mikrofonlarının kullanılması tavsiye edilir. En düzgün frekans cevabı almak için mikrofon, gürültü kaynağının geometrik merkezine doğru yöneltilmelidir.



Şekil 3.8 Ses alanlarına göre mikrofON çeşitleri

3.3.10 Techizat Konfigürasyonu ve Ayarları

ISO 7779 standardı için dokuz noktada ses basınç ölçümleri gereklidir. İlave olarak, kullanıcı ve bekleme konumlarında da ölçümler yapılmalıdır. ISO 7779 standardını sağlamak için 10-13 mikrofON konumluk bir seride ölçüm yapmak gerekecektir.

13 mikrofON konumunda ölçüm yapmak için birkaç teçhizat konfigürasyon kullanılabilir. Ölçüm zamanı kritik olduğunda çok kanallı analizör kullanarak 13 mikrofON konumunun tümünü aynı ölçmek mümkündür. Bu konfigürasyon 13 mikrofON ve önyükselteç, 7 adet iki kanallı mikrofON güç kaynağı ve en azından 13 kanal gerçek zaman analizini gerektirir. Bu sistem çok pahalı olabilir, ancak bazı durumlarda ekonomik olabilir. Sistemin bir faydası tüm ölçümlerin aynı anda yapılması, bu nedenle çalışma şartlarından kaynaklanan az değişim beklenebilmesidir. Geçici ve kesikli oluşan akustik sesli cihazlar için bu konfigürasyon

önemlidir. Eğer zaman daha az kritik ise daha tipik bir konfigürasyon kullanılabilir. Bu sistem, 13 mikrofon önyükseltici, 7 iki kanallı mikrofon güç kaynağı, bir multiplexer ve bir adet iki kanallı gerçek zaman analizöründen oluşur. HP-1B program aracılığıyla herhangi bir müdahale olmadan, ses güç belirlemesini yapabilir.

Daha ucuz bir konfigürasyon, iki mikrofon ve önyükselteç, iki kanal güç kaynağı ve bir adet gerçek zaman analizöründen oluşur. Bu sistemle ölçüm, mikrofonun çiftinin konumu ve yönü ölçümlerden önce değiştirileceğinden daha önce bahsedilen diğer iki konfigürasyondan daha yorucudur.

3.3.11 Ölçüm Prosedürü

Test odası hazırlandıktan, ölçüm yüzeyi tanımlandıktan ve ölçüm konfigürasyonu yapıldıktan sonra ölçümler yapılabilir. Aşağıda izlenen prosedür ISO 7779 göre yapılan tipik bir ses güç ölçüm prosedürüdür.

3.3.11.1 Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

Mikrofon, önyükselteç, güç kaynağı ve analizör giriş kanallarından oluşan her mikrofon sistemi her seri ölçüm öncesinde kalibre edilmelidir. Bu işlem ölçüm sisteminin fonksiyonunu kontrol edecek ve farklı zamanlarda yapılan ölçümler arasında karşılaştırma yapmaya imkan veren yüksek doğruluk elde etmeyi sağlayacaktır. Kalibrasyon, bir veya iki frekansta ± 0.5 dB'lik doğrulukla yapılmalıdır. Mikrofon sisteminin hassasiyeti pistonfon veya ses düzey kalibratörü kullanarak ayarlanır. Pistonfon tipik olarak ± 0.3 dB'den daha doğrudur. Ses düzey kalibratörü ise istenilen ± 0.5 dB'lik doğruluk içindedir. Yaygın olarak kullanılan ses düzeyi kalibratörler 1 kHz'lik frekans ve 94 dB (≈ 1 Pa) ses basınç seviyesine sahiptir.

Mikrofon ve ölçüm sistemi kullanım sıklıklarına uygun periyotlarda genel kalibrasyonlara tabii tutulmalıdırlar.

3.3.11.2 Geriplan Gürültüsü Ölçümü

Tüm SPL ölçümleri, geriplan gürültüsü ölçülen SPL değerined 10 dB daha küçük olmadığı sürece düzeltilmelidir. Bu nedenle ses basınç düzeyi ölçümlerindeki ilk adım, gürültü kaynağı kapalı iken, kullanıcı ve bekleme konumlarını da içerecek şekilde her mikrofon konumunda ses basınç düzeylerini ölçmektir. Bu geriplan gürültüsü, ölçülen SPL'den aşağıdaki ifade yardımı ile çıkartılır.

$$L_p = 10 \log (10^{0.1L_c} - 10^{0.1L_B}) \quad (3.6)$$

Yukarıdaki ifadede L_p düzeltilmiş ses basıncı, L_c gürültü kaynağı açık iken ölçülen ses basınç düzeyi, L_B ise gürültü kaynağı kapalı iken ölçülen geriplan gürültüsüdür. Bölüm 1.7.2'de verilen ses basınç düzeylerinin çıkartılmasına ilişkin grafik ile yapılan işlemler, yukarıda verilen (3.8) eşitliğini kullanarak analitik olarak yapılabilir.

3.3.11.3 SPL Aralığının Kontrolü

Geriplan gürültüsü kontrol edildikten sonra herbiri mikrofon konumunda ses basınç düzeyleri ölçülür. Bölüm 3.3.9'da verilen yöntem kullanılarak SPL aralığının kabul edilebilirliği kontrol edilir.

3.3.11.4 Ses Gücü Hesabında Kullanılan SPL Ölçümleri

Bu kısımda artık ses gücü hesaplarında kullanılan ses basınç düzeyleri ölçülmektedir.

Ses basınç düzeyi, üç çalışma dönemini kapsayacak bir zaman aralığında entegre edilir. Minimum entegrasyon süresi 8 saniyedir ancak bu aralık, uzun çalışma aralığı için 32 sn'ye çıkartılabilir. Ortalama, sık sık L_{eq} olarak refere edilen ses basınç düzeyinin lineer entegrasyonu olmalıdır. Tüm ölçüm için A-ağırlığı kullanılmalıdır, fakat 1/3 oktav band verileri ağırlıksız olmalıdır.

3.3.11.5 Kullanıcı Konumunda Ölçüm

Kullanıcı veya bekleme konumunda yapılan ses basınç düzeyi ölçümleri aşağıdaki kontrol prosedürüne göre yapılmalıdır.

- A-ağırlıklı SPL ve ağırlıksız 1/3 oktav band SPL
- A-ağırlıklı darbe
- Ağırlıksız darband FFT

3.3.11.6 Düzeltilmiş SPL ve Ses Gücünün Hesaplanması

Tüm mikrofon konumlarındaki ses basınç düzeyleri, geriplan gürültüsünü gözönüne alarak düzeltilir. Yüzey üzerinde ölçülen ses basınç düzeylerinin ortalaması

$$\bar{L}_{pA} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pAi}} \right) \quad (3.7)$$

ifadesi yardımıyla hesaplanır.

- N : Ölçüm yüzeyi üzerindeki mikrofon konumlarının sayısı
 L_{pAi} : i. konumdaki düzeltilmiş, A-ağırlıklı ses basınç düzeyi
 $\bar{L}_{pA}$: A-ağırlıklı, yüzey-ortalama ses basınç düzeyi

Toplam A-ağırlıklı ses güç düzeyi

$$L_{WA} = L_{pA} + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (3.8)$$

ifadesinden faydalanılır.

S : ölçüm yüzeyinin toplam alanı, m^2

S_0 : referans yüzey alanı, $1 m^2$

(3.8) eşitliği sadece standart ölçüm yüzeyi (herbir ölçüm noktasında eşit yüzey alanı kullanılır) kullanıldığında uygulanır. Herbir mikrofon farklı yüzey alanlarını gösterdiği diğer mikrofon aralıkları kullanılırsa (3.8) eşitliği

$$L_{WA} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N (10^{0.1 L_{pAi}} * S_i) \right) \quad (3.9)$$

şeklini alır. S_i , i. mikrofonun konumunun kapladığı alandır. ISO 3745 standardında; (3.8) eşitliğine ilave olarak bir düzeltme daha yapılır. Bu düzeltme atmosferik basınç ve sıcaklığından kaynaklanan düzeltmedir.

$$C = - 10 \log_{10} \left[\left(\frac{293}{273+T} \right)^{1/2} * \frac{p}{1000} \right] \quad (3.10)$$

T : Ortam sıcaklığı, $^{\circ}C$

p : Atmosferik basınç; mbar

3.3.11.7 Ölçüm Raporu

Ses gücü ölçümleriyle ilgili bir ölçüm raporu aşağıdakileri içermelidir.

- Ses gücü ölçülen kaynağın adı, modeli ve seri numarası,
- A-ağırlıklı ses güç seviyesi; L_{WA} dB ve 1 pW biriminde,
- 1/3 oktav bantlardaki ses güç düzeyi L_w , dB ve 1 pW biriminde,

- Çalışma şartlarının belirtilmesi,
- Ölçüm yüzeyi, ölçüm aralığı, yüzey alan, mikrofon konumu ve yönünün belirtilmesi,
- Geriplan düzeltmesi,
- Ölçümün konumu,
- Tarih,
- Ölçümü yapan kişinin Adı-Soyadı,
- Ölçümde kullanılan referans cihazlar.

3.4 Ses Şiddeti Ölçerek Ses Gücünün Hesaplanması

Ses şiddeti, verilen bir yönde akustik enerji akışının oranıdır. Vektör nicelik olduğundan bir kaynaktan yayılan net gücü tayin etmede kullanılabilir. Ölçüm yüzeyinin, kaynağı sardığını kabul ederek, ölçüm yüzeyindeki her bir parçadan net güç dağılımını toplayarak, toplam ses gücü hesaplanabilir.

Şiddet gerçekte iki bileşenden oluşur : aktif ve reaktif şiddet. Aktif şiddet, net enerji akışını gösterir, basınç gradyenleriyle oluşur. Diğer taraftan reaktif şiddet, enerji akışına neden olmayan akustik ortamda depo edilen enerjidir. Böyle bir ortam yansıtıcı oda yada bir dalga tüpünde oluşur. Sert duvarlar ve büyük yansıtma katsayılarından dolayı, çok küçük akustik enerji, duvarlar tarafından yutulmasa veya oda tarafından taşınsa bile ses basıncı büyük olabilir.

Analitik olarak aktif şiddet basınçla göre parçacık hızının açısı ile reaktif şiddetten türetilir. Aktif bir ortamda basınç ve hız aynı fazdadırlar. Bu nedenle net bir enerji akışı vardır. Reaktif bir ortamda basınç ve parçacık hızı aynı fazda değildirler. Herhangi bir güç transfer edilmez. Reaktif ortamda basınç maksimum iken hız sıfırdır. Aktif ortamda basınç maksimumken hız da maksimumdur.

3.4.1 *Gürültülü Ortamda Ses Gücü Ölçümü*

Toplam ses gücünü ölçmek için ses şiddeti kullanmanın ses basıncına göre büyük avantajı vardır. Çünkü kararlı dış gürültü kaynakları şiddet ölçümünü etkilemez. Bir yüzey üzerinde harici bir kaynağın etkisi pozitif olduğunda yüzeyin diğer tarafındaki etkisi negatif olacaktır. Bu ise yüzeyden sıfır güç çıkışına neden olur.

Dış gürültü kaynakları kararlı olmalıdır. Aksi takdirde hatalar ortaya çıkar. Bunun nedeni gürültüden kaynaklanan, yüzeyin bir tarafındaki şiddetin diğer taraftaki şiddete eşit olmayışıdır. Diğer nedenler ise ölçümlerin farklı zamanlarda yapılması veya dış gürültünün kesikli olmasıdır.

Gürültü kaynağı kararlı olmalıdır, yoksa net enerji toplandığında hatalar ortaya çıkar. Ölçümler farklı zamanlarda yapılırsa, veya harici kaynak kesikli veya iki ölçüm arasında farklı ise ölçüm yüzeyinin bir tarafındaki şiddet diğer tarafındaki şiddete eşit olmayabilir. Bu nedenle hatalar oluşabilir.

Çoğu gürültü kaynakları kararlıdır. Örnek olarak, havalandırma gürültüsü, transformatör ve lambalardan gelen vınlama sesi verilebilir. Diğer kararlı gürültü kaynakları cihazların üzerindeki soğutma fanları veya disk sürücünün zırlıtlarıdır.

Ses gücü skaler büyüklük - yönsüz büyüklük - olduğundan, gürültünün olduğu yerde ses, basınç ile ses gücü belirlenemez. Çünkü harici gürültü, gücü ölçülen kaynaktan ayırt edilemez. Dolayısıyla gürültü, ölçümü etkileyebilir.

3.4.2 *Ses Şiddetinin Ölçülmesi*

Doğrudan bir mikrofona ile ölçülebilen ses basıncına karşılık; ses şiddeti, basınç ve

parçacık hızı ölçümlerinden gerçek zamanda hesaplanmalıdır. Ses basıncı ve parçacık hızını ayrı olarak ölçebilen tansdüsere ses şiddeti probu denilir. Gerçek zamanda ses şiddeti hesaplayan elektronik cihaza ses şiddeti analizörü denir.

Şiddet, birim alandaki net güce eşittir. Verilen bir yönde kuvvet ile hızının çarpımı güce eşit olduğundan,

$$I = \frac{W}{A} = \frac{F \cdot V}{A} = \frac{F}{A} \cdot V = p \cdot V \quad (3.11)$$

eşitliğini yazmak mümkün olur.

I	:	Şiddet
W	:	Güç
A	:	Alan
F	:	Kuvvet
p	:	Basınç
V	:	Hız

Hız vektör, basınç skaler bir nicelik olduğundan şiddet vektörel bir nicelik olur. Bu nedenle (3.11) eşitliği uzaydaki bir nokta için aşağıdaki şekli alır.

$$I = p \times V \quad (3.12)$$

Hız dolayısıyla şiddet, kartezyen koordinatlarda üç bileşene sahiptir (I_x , I_y , I_z). Tipik olarak bir prob sadece eksenini boyunca olan ses şiddetini ölçer. Ölçülen şiddet, gerçek şiddetin o yöndeki izdüşümüdür.

Ses gücünü belirlemede, ölçüm yüzeyindeki bir birleşen, test altındaki kaynağın toplam ses gücünü belirlediği için önemlidir. Bu nedenle ses şiddet prob eksenini, ölçüm yüzeyine dik tutmak gereklidir. Eğer ölçüm yüzeyi küresel ise bu işlem biraz

zor olacaktır.

3.4.2.1 Bir Yöndeki Hızın Ölçülmesi

Ses şiddeti ölçümlerindeki en büyük teknik gelişme hızın ölçülmesidir. Şu anda hız ölçümü için en iyi yöntem basınç farkı tekniğidir. Hareket denkleminde; hız ve basınç farkı arasındaki ilişki bulunabilir. Hız ise, iki mikrofon arasındaki basınç farkından hesaplanabilir. V_p prob eksenindeki hız bileşeni ise, prob eksenindeki ses şiddeti hız ile basıncın çarpımına eşit olur.

$$I_{prob} = p \cdot V_{prob} \quad (3.13)$$

3.4.2.2 Basınç Farkının Hıza Dönüştürülmesi

Meteoroloji'den biliyoruz ki iki konum arasında basınç farkı olduğunda rüzgar eser. Benzer olarak akustikte, basınç farkı hava moleküllerinin ivmelenmesine neden olur. Newton'un ikinci konusu

$$\vec{F} = m \frac{\partial^2 \vec{x}}{\partial t^2}$$

dir. Sıkıştırılabilir akışkan akışı için; basınç, yoğunluk ve hızın değişimi (ivmelenme) arasında

$$-\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \quad (3.14)$$

bağıntısı vardır.

ρ_0 : hava yoğunluğu

$\partial p(x,t) / \partial x$: Basınç gradyeni

$\partial v(x,t) / \partial t$: Hızın zamana göre değişimi (ivmelenme)

(3.14) eşitliğini hızın değişimi cinsinden yazarsak

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \quad (3.15)$$

elde ederiz. Ses şiddet probu için basınç gradyeni yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \approx \frac{p_2 - p_1}{\Delta r} \quad (3.16)$$

p_2, p_1 : Sırası ile 2. ve 1. mikrofonda ölçülen ses basıncı

Δr : iki mikrofon arasındaki mesafedir.

Ayrıca hız, ivmelenmenin zamana göre integralidir.

$$V(x,t) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} dt \quad (3.17)$$

Ses şiddeti için (3.15) - (3.16) - (3.17) eşitliklerini birleştirirsek

$$V = \frac{1}{\rho_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_2 - p_1}{\Delta r} dt \quad (3.18)$$

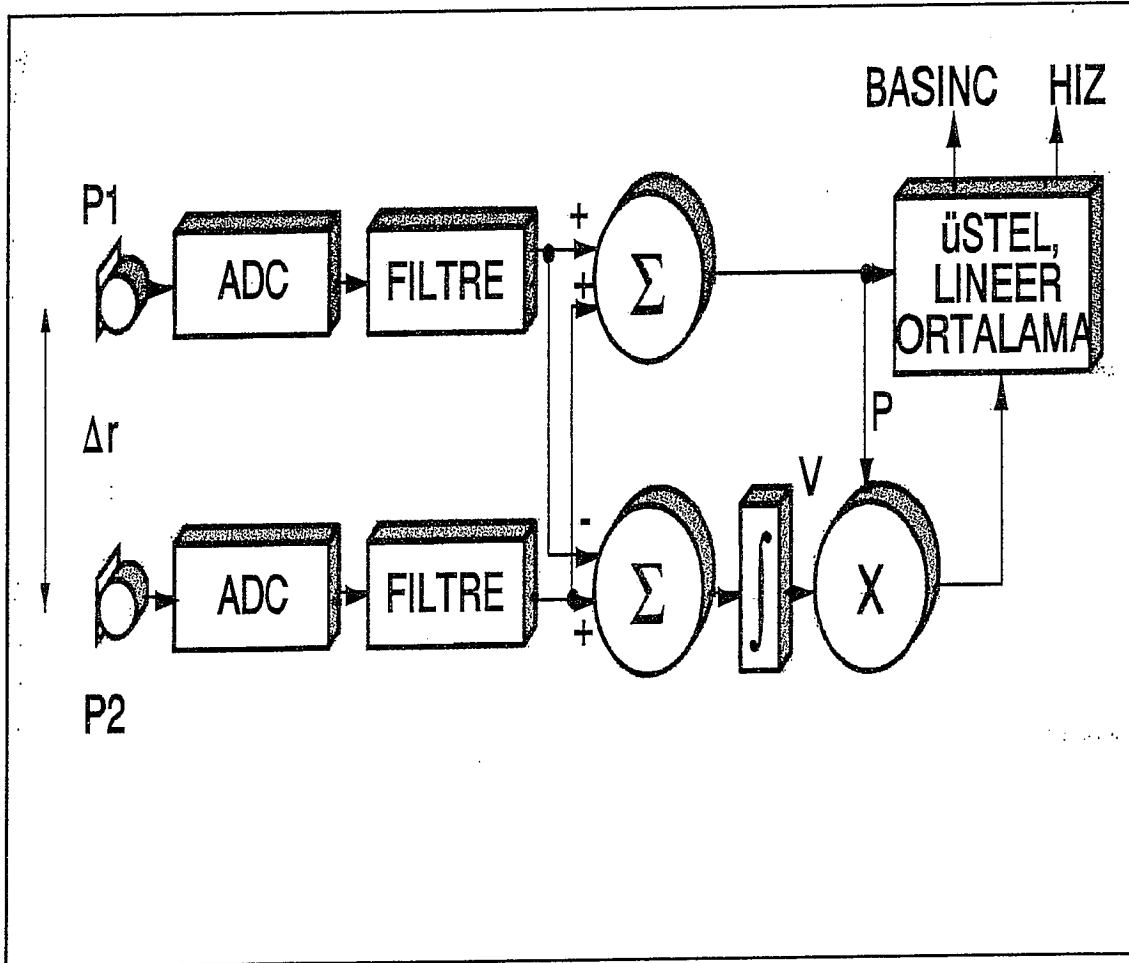
ifadesini elde ederiz. Bu eşitlik; mikrofon çifti arasındaki orta noktadaki akustik hızın ölçülmesini gösterir. Aynı noktadaki basınç

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (3.19)$$

eşitliği ile verilir. Sonuç olarak prob eksenindeki şiddet eşitliği aşağıdadır.

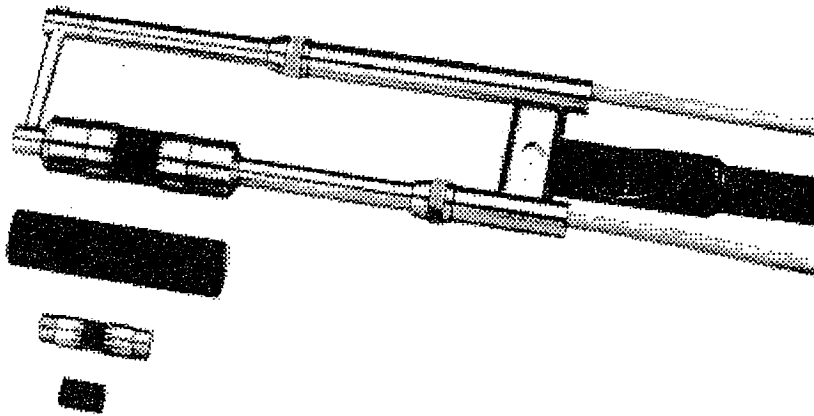
$$I_{prob} = - \frac{(p_2 + p_1)}{2\rho_0 \Delta r} \int_{t_1}^{t_2} (p_2 - p_1) dt \quad (3.20)$$

Aynı anda iki basınç ölçümünden anlık şiddeti hesaplamak için gerçek zaman analizöründe kullanılan algoritma yukarıdaki eşitliktir. Şiddet, istenilen 1/3 oktav bandında ölçüleceğinden her bir basınç sinyali hesaplanmadan önce 1/3 oktav band geçiren filtrelerden geçer. Şekil 3.9'da ses şiddetini ölçmede kullanılan metodun blok şeması görülmektedir [9].



Şekil 3.9 Ses şiddeti ölçümleri ile ses gücü ölçüm blok şeması

Ses şiddeti ölçümlerinde en çok kullanılan transduser iki basınç mikrofonlu ses şiddet probudur. Bir tutaç boyunca monte edilmiş faz-eşleştirilmiş iki mikrofon kullanılır. Mikrofon diyaframları daima aralarındaki bir katı aralayıcı (spacer) ile yüz yüze durmaktadırlar. Diğer konfigürasyonlar da kullanılabilir ancak aralarında katı bir aralayıcı olan yüz-yüze düzenleme en iyi performansı vermektedir.



Şekil 3.10 Ses şiddet probu

Ses şiddet probunun mikrofonları ilgi duyulan frekans bölgesindeki şiddeti ölçebilmelidir. Buna ilave olarak probun mekanik bileşenleri ses alanını etkilememelidir. IEC 1043 gibi standartlarda gereken doğruluk şartlarını sağlamak için probda; yüksek kaliteli, faz eşlemeli serbest alan mikrofonları kullanılmaktadır. 50-6300 Hz'lik frekans aralığında 1/2" mikrofon çifti kullanılır. 10 kHz'e kadar olan ölçümler için 1/4" gibi daha küçük mikrofonlar gerekli olacaktır.

Optimum dinamik ölçüm kapasitesini sağlamak için ses şiddet probu farklı

boyutlardaki aralıkları kullanmaya elverişli olmalıdır. Genelde kullanılan aralıklar 6-50 mm aralığındadır. Düşük frekans ölçümleri için uzun aralıklar gereklidir.

3.4.4 Ölçümdeki Hata Kaynakları

Doğru ses şiddet ölçümleri yapmak için, ses şiddet probu ve analizörünün limitleri hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Ses şiddeti ölçümleri aynı anda basınç ve hız ölçümleri gerektirdiğinden, şiddet ölçümü sadece basınç ölçmekten daha zordur. Çok yakın olarak birbirine eşlenmiş olan yüksek kaliteli proplar ve analizörler kolaylık sağlarlar ancak buna rağmen sistemden kaynaklanan kısıtlamalar bilinmelidir.

3.4.4.1 Yüksek Frekans Hataları

Yüksek frekansta birçok hata kaynağı vardır.

- Mikrofonun, koruma ızgarası (protection grid), aralayıcı ve probun kendisinin fiziksel etkileri
- Sistemin genlik ve faz eşlemesi
- Etkin aralayıcı mesafesinin değişimi
- Düz hat yaklaşım hatası

Yüksek frekansta düz hat yaklaşım hatası dominant olur. Bu hata doğru olmayan basınç ve hıza sebep olur.

İki mikrofondaki basınç ölçümlerinden türetilen mikrofonun orta noktasındaki şiddet; basınç eşitliğinden türetilen, orta noktadaki tam şiddet ile karşılaştırılır. Mikrofonlar arasındaki aralayıcının boyutu ve dalga boyuna bağlı olarak yaklaşım hatası olarak verilir. Bu hata formülü, seçilen mikrofon aralığı için mücadele edilen frekans bölgesinin belirlemek için kullanılır.

$$e_{prob} = 10 \log \left(\frac{\sin \left(2\pi \frac{\Delta r}{\lambda} \right)}{2\pi \frac{\Delta r}{\lambda}} \right) \quad (3.21)$$

Çizelge 3.2 1/3 Oktav Band - Aralayıcı Boyutu

Aralayıcı Boyutu mm	1 dB'lik Hata İçinde Kullanılan Maksimum Frekans Hz
6	10000
10	6300
12	5000
50	1250

1 dB'lik veya daha az yaklaşım hatası için çizelge 3.2.'deki frekanslarda veya altındaki ölçümler geçerlidir. Kural olarak, aralayıcının dalga boyuna oranı yaklaşık 0.18'den az olduğunda hata 1 dB'dir.

3.4.4.2 Düşük Frekans Hatası

(3.19) denkleminde de görüleceği şiddet, iki mikrofondan okunan basınçtan elde edilir. Bu ölçümler sonlu fark yaklaşımlarından dolayı yüksek frekans hatalarına karşı eğilimlidir.

Düşük frekanslarda, parçacık hızını doğru ölçebilme üzerinde etkisi olan diğer bir hata kaynağı ortaya çıkar - faz benzeşmemesi. Faz benzeşmemesi tüm ses şiddet prob ve analizöründe vardır. Fakat aşağıda gösterilen nedenlerden dolayı; doğru ölçümler için düşük frekans faz eşlemesi dikkatlice belirlenmelidir. Dalgaboyunun,

aralayıcı uzunluğu ile kıyas edilebildiği düşük frekanslarda p_1 ve p_2 basınçları arasındaki faz farkı küçük olacaktır. Aslında çok düşük frekanslarda fark o kadar küçüktür ki bu fark probun ve analizörün faz hatası tarafından maskelenebilir. Bu durum, ses basıncının, mevcut ses şiddetinden 20 dB ya da daha fazla olduğu reaktif şiddetin varlığına bağlanabilir. Şiddet, basınç, frekans ve aralayıcı boyutu birbirleriyle nasıl ilişkilidirler? Faz doğruluğu, şiddet ölçüm doğruluğunu nasıl etkiler ? Şiddet, basınç, faz farkı, frekans ve mikrofon aralığı aralığındaki ilişki

$$I = \frac{p_1 p_2 \sin \phi}{2\pi f \rho_0 \Delta r} \quad (3.22)$$

ile verilir.

- p_1, p_2 : 1 ve 2 mikrofondaki etkin ses basınçları
 ϕ : f frekansında kanal 1 ve kanal 2 arasındaki ölçülen faz farkı
 ρ_0 : havanın yoğunluğu
 Δr : aralayıcı uzunluğu.

Düşük frekanslarda, her bir mikrofondaki basınçlar yaklaşık olarak eşittir. Buradan (3.22) eşitliği

$$I = \frac{p^2 \sin \phi}{2\pi f \rho_0 \Delta r} \quad (3.23)$$

olarak yazılabilir.

Ses basınç düzeyinin, ses şiddeti düzeyine oranı basınç-şiddet indeksi olarak adlandırılır ve akustik ortamın iyi bir göstergesidir. Yüksek P-I indeksli ölçümler çok zordur çünkü, indeks arttığında prob aralayıcısı boyunca faz değişimi küçülür. (3.4) ve (3.5) eşitliklerini kullanarak basınç-şiddet indeksi

$$\sin \phi = \frac{2\pi f \rho_0 \Delta r}{p^2/l} \quad (3.24)$$

$$L_{p'} = L_p - L_I = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} / \frac{l}{l_0} \right) = 10 \log \left(\frac{p^2}{l} \cdot \frac{l_0}{p_0^2} \right) \quad (3.25)$$

Buradan

$$\frac{p^2}{l} = \frac{p_0^2}{l_0} 10^{0.1 L_{p'}} \quad (3.26)$$

eşitliği yazılabilir. Faz açısı eşitliği

$$\sin \phi = \frac{2\pi \rho_0 l_0}{P_0^2} \frac{f \Delta r}{10^{0.1 L_{p'}}} \quad (3.27)$$

olarak yeniden yazılabilir. Yukarıdaki eşitlikten ölçülen faz açısının frekans ve mikrofon aralayıcısı ile değeri ancak P-I indeksi ile ters orantılıdır. Diğer bir deyişle, şiddete göre yüksek basınçlı durumlarda (yansıtıcı oda gibi reaktif ses alanında) ölçülen faz farkı küçüktür. P-I indeksi yüksek olduğunda, bilhassa 10 dB'nin üzerinde olduğunda probdaki faz değişimi küçük olur. Ses şiddet probu ve analizörü, ölçülen herhangi bir faz değişiminden küçük bir faz doğruluğuna sahip olsaydı bu problem olmazdı. Fakat böyle bir durum yoktur. En iyi şiddet analizörü $\pm 0.02^\circ$ 'lik çapraz kanal faz doğruluğuna sahiptir. En iyi ses şiddeti problemleri 0.05° içerisinde eşlenmişlerdir.

3.4.4.3 Artık (Residual) Şiddet

Bir ses şiddet probu; her iki mikrofonun da aynı fazlı, aynı ses basıncına maruz kaldığı tamamen reaktif bir ortama konulduğunda şiddet analizörü sıfır şiddet göstermelidir. Fakat, probdaki mikrofonlar arasındaki kalıcı faz eşlenmemesinden

dolayı sıfır şiddet okunması mümkün değildir. Ses şiddet analizörü; ses alanının olmayan, prob ve analizörün faz eşlenmemesini yansıtan bazı artık şiddet gösterir. Bu geriye kalan "artık şiddet" olarak adlandırılır. Reaktif basınç artığında artık şiddet düzeyi artar. Dolayısıyla bu terimi artık basınç-şiddet indeksi ya da L_{RPI} olarak refere etmek kabul edilmiştir. Bu terim doğru ölçümlerin yapılabildiği frekans bölgesini tanımlar.

3.4.5 Ses Şiddeti Kullanarak Ses Gücünün Belirlenmesi

Ses güç ölçümünü yapan kişi, ses şiddet probu ve analizörünün kapasitesini test ortamı ile uyumlaştırdığı sürece, ses şiddeti ile doğru ses gücü ölçümleri yapılabilir. Ölçümler gürültülü ortamda yapılacak ise gürültü kararlı olmalı, ölçüm sisteminin faz doğruluğu yeterli olmalıdır.

Aşağıda izlenilen ve önceki kısımlardaki hataların analizine dayalı olan ölçüm prosedürü ile doğru güç ölçümleri yapılabilecektir.

3.4.5.1 Uygun Frekans Bölgesinin Seçilmesi

Bir cihazın ses gücünü belirlemek için birçok uluslararası standard, ölçümlerin 100 Hz'den 6300 Hz'e kadar 1/3 oktav bandlarında yapılmasını gerektirir. Bazı özel cihazlar için bir band aralığı daraltılabilir ya da genişletilebilir.

Örneğin hidroelektrik jeneratörü gibi çok büyük makinaların ses gücü 100 Hz'nin altında oldukça çok enerji taşıyabilir. O halde gerekli olan frekans bölgesi 50-4000 Hz aralığıdır. Benzer olarak küçük bir türbin 6300 Hz'in üzerinde önemli gürültüye sahip olabilir. Gerekli frekans bölgesi 100 Hz - 10 kHz dir. Gerekli frekans bölgesinin

taini için gerekli bilgi doğru test ortamı ve uygun prob-analizör seçimi açısından önemli yer tutar.

Frekans bölgesi, frekansın düşük olduğu kısımda genişletiliyorsa prob ve analizörün dinamik kapasitesi uygun olmalıdır. Bununla ilgili açıklama Kısım 3.4.4.2'de düşük frekans hataları kısmında açıklanmıştı. Düşük frekanslarda, mikrofon aralayıcısı ortasında faz değişimi küçüktür. Bu nedenle sistemin faz doğruluğu, ölçümün yapılabilirliğini etkileyebilir. Bu durum, akustik ortam reaktif olduğu zaman daha kötü olur. 100 Hz'in altındaki frekanslarda ölçümler yapılacak ise yüksek kaliteli ses şiddet prob ve analizörü kullanılmalıdır. Uzun aralayıcılar kullanılmalı, test ortamı mümkün olabildiğince serbest alan olmalıdır. 6300 Hz'in ötesindeki şiddet ölçümlerinde; 10 kHz'e kadar düz, faz-eşlemeli frekans cevabı olan özel problemler kullanılmalıdır. Ayrıca kullanılacak analizör 10 kHz'e kadar gerçek zamanda ölçebilmelidir.

3.4.5.2 Ses Şiddet Probonun Konfigürasyonu

Frekans bölgesi belirlendikten sonra uygun, gerekli aralayıcı seçilebilir. Aralayıcı boyutu frekans bölgesine, akustik çevreye (L_{PI}) ve prob ve analizörün toplam faz-eşlenmemesine bağlıdır. Genelde her bir ölçüm için iki aralayıcı kullanılabilir. Birden fazla aralayıcı kullanıldığında genel olarak her bir aralayıcı için frekans bölgesi üç ya da daha çok 1/3 oktav bandı üst üste gelir. Her bir ölçümden gelen sonuçlar band seviyesini kullanarak uyumlu spektrum oluştururlar. İhtiyaç duyulan en büyük test frekansı, verilen yaklaşım hatası için aralayıcının boyutunun ne kadar olması gerektiğini belirler (Çizelge 3.2). İhtiyaç duyulan en düşük test frekansı, aralayıcının ne kadar uzun olacağını belirler. Düşük frekans kapasitesi, bir kaç faktöre bağlıdır.

- * Aralayıcı boyutu,
- * Akustik ortamın basınç-şiddet indeksi (L_{PI}),

- * Probe ve analizörün faz doğruluğu,
- * İstenilen doğruluk.

Küçük açılar için (3.24) eşitliği, $\sin \phi = \phi$ yazılabileceğinden,

$$\phi = \frac{2\pi \rho_0 l_0}{P_0^2} \frac{f \Delta r}{10^{0.1 L_{PI}}} \quad (3.28)$$

olarak yazılır. ϕ iki kanal arasındaki faz farkı idi. Yine (3.25) eşitliği, artık şiddet için yazıldığında

$$L_{RPI} = 10 \log \left(\frac{2\pi \rho_0 l_0}{P_0^2} \frac{f \Delta r}{\sin \theta_e} \right) \quad (3.29)$$

θ_e :ölçüm sisteminin faz doğruluğu

elde edilir. Küçük açı yaklaşımını yaptığımızda (3.26) eşitliğine benzer olarak

$$\theta_e = \frac{2\pi \rho_0 l_0}{P_0^2} \frac{f \Delta r}{10^{0.1 L_{RPI}}} \quad (3.30)$$

Düşük frekans hatası, sistemin faz doğruluğuna göre

$$e_0 = 10 \log [1 \pm 10 \log^{0.1} (L_{PI} - L_{RPI})] \quad (3.31)$$

ifadesiyle verilir. Gerekli kısaltmalar yapıldığında

$$e_0 = 10 \log \left(1 \pm \frac{\theta_e}{\phi} \right) \quad (3.32)$$

elde edilir. e_0 , 1 dB'den küçük olacak ise θ_e/ϕ oranı 1 / 4.86'ye eşit olmalıdır. Bu ifade, aralayıcıdaki faz değişimi, ölçüm sisteminin faz doğruluğundan 4.86 kez daha büyük olduğunda ölçüm hatası 1 dB'den az demektir.

1 dB'lik ölçüm doğruluğu, akustik ortam ve frekans için (3.26) ifadesinden

faydalanarak gerekli olan minimum aralayıcı boyutunu belirleyelim. $\phi = 4.86 \Theta_e$ dir. Özel 1/3 oktav bandın en altında merkez frekanstan - 1/6 2 faktörlük uzaklıktaki frekans için de gerekli olduğundan minimum aralayıcı boyutu :

$$\Delta r = \frac{4.86 \Theta_e (2\pi / 360^\circ) P_0^2 10^{0.1 L_{PI}}}{2\pi \rho_0 I_0 (2^{-1/6} f)} \quad (3.33)$$

$$\Delta r = 4.7 \left(\frac{\Theta_e 10^{0.1 L_{PI}}}{f} \right)$$

olarak hesaplanabilir.

- L_{PI} : ortamın basınç-şiddet indeksi (akustik ortam)
- f : ilgi duyulan 1/3 oktav bandın merkez frekansı
- Θ_e : sistemin faz hatası

3.4.5.3 Test Ortamı

Ses şiddet ölçümleri için yansız odaların gerekli olmamasına rağmen; test ortamının, ses şiddetinden hesaplanan ses gücü yaklaşımlarını bozmamasına dikkat edilmelidir. Örneğin test edilen cihazın dışındaki gürültü, kesikli olmadığı sürece kabul edilebilir. Aynı zamanda şiddet, bir işyerinin zemini ve sert duvarları ve tavanı gibi reaktif ortamda ölçülürse, aşağıda prosedürü kullanmak suretiyle ölçülen basınç-şiddet indeksi, ölçüm cihazlarının dinamik kapasitesi ile karşılaştırılmalıdır.

- Test edilecek cihaz çalışırken ölçüm yüzeyi üzerinden ortalaması alınmış basınç-şiddet indeksi (L_{PI}) ölçülür.

- Tamamen reaktif ortamda (kalibratör) basınç-şiddet indeksini ölçerek ya da üreticinin verilerini kullanarak, prob ve analizöründen oluşan ölçüm sisteminin artık

basınç-şiddet indeksini L_{RPI} 'yi belirlenir.

- Bu test ortamında ilgi duyulan tüm frekanslarda L_{PI} ve L_{RPI} arasında en azından 7 dB'lik farkın olup olmadığı kontrol edilir. 7 dB'lik fark, ölçümlerin 1 dB'den daha az ölçüm hatası ile yapılması demektir.

3.4.5.4 Ölçüm Yüzeyi

Ses şiddeti ölçümleri için ölçüm yüzeyinin seçimi çok önemlidir. Ölçüm yüzeyi ölçülen cihazı tamamen sarmalıdır. Yansıtıcı bir taban kabul edilebilir. Halı veya çim gibi yutucu yüzeylerden kaçınmak gerekir. Şiddet ölçümleri test edilen cihazdan çok uzakta ölçülmemelidir.

Ses şiddeti probu üreticisi, yakın olan ölçümlerinin standartları sağladığını belirtiyorsa, test edilen kaynağa çok yakın olan yakın alanda şiddet ölçümleri yapılabilir. Genelde, yan veya arka havalandırmalı, faz-eşlemeli yönsüz mikrofon kartrıçleri kullanılmaktadır. Bu havalandırmalar çok iyi eşlenseler bile yakın alanda düşük frekans hatalarına yol açabilir. Özel havalandırma odalı faz-eşlemeli mikrofonlar bu problemleri azaltmışlardır.

Kapalı ölçüm yüzeyinin seçimi rastgele olsa bile, ölçümlerin kolaylığı açısından düzgün yüzeylerin kullanılması tavsiye edilir. Dikdörtgen kutular, yarı küreler ve test edilen cihazın yüzey şekli genel de kullanılır. Herbir yüzey, kaynaktan aynı mesafede ve yaklaşık olarak aynı alana sahip küçük yüzeylere ayrılmalıdır.

3.4.5.5 Alan Kalibrasyonu

Ses şiddet probunun heriki mikrofonu, dolayısıyla analizörün her iki kanalı, ölçüm öncesi ve sonrasında tek frekans ve genlikte kalibre edilmelidir. Tipik olarak ses

şiddeti analizörünün heriki kanalının hassasiyeti, pistonfon veya ses düzeyi kalibratörü kullanarak ayrı ayrı ayarlanır.

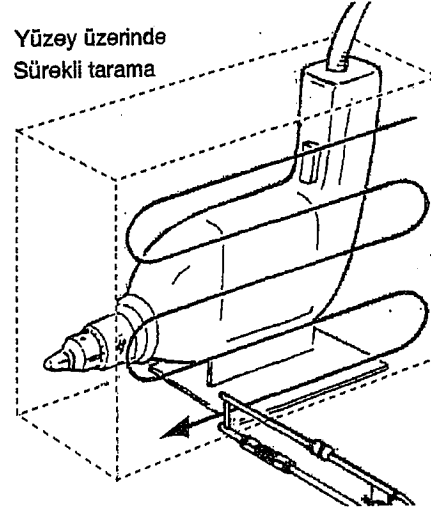
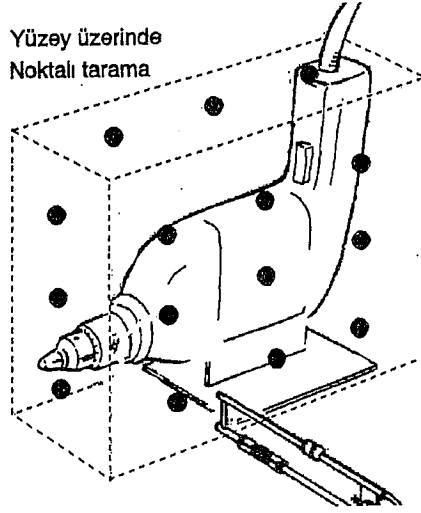
3.4.5.6 Alan Kontrolu

Ses şiddeti ölçüm sisteminin performansını belirlemek için en iyi yol, tipik bir ölçüm noktasında kaynağın şiddetini ölçmek, probu aynı noktada 180° çevirdikten sonra şiddeti yeniden ölçmektir. 200 ve 5000 Hz arasındaki 1/3 oktav bandda şiddet düzeyi 1 dB'den daha çok değişmemeli ve şiddet ters işaretli olmalıdır.

3.4.5.7 Yüzey Üzerinde Şiddet Ölçümü

Genel olarak, her bir alt yüzeyde şiddeti ölçmek için iki teknik kullanılır. Sabit nokta ve yüzey taraması. Sabit nokta ölçüm tekniği, ölçüm noktalarının yeterliliği için bir test gerektirir. Çünkü, çok belirgin yönlü gürültü yayan bir kaynak modeli; küçük, yönsüz kaynaktan daha iyi bir ölçüm ağı (mesh) gerektirir.

Yüzey taraması için, analizör lineer ortalama alırken prob, ölçüm yüzeyi üzerinde yavaşça taratılır. Bu yöntem, analizör belli bir aralıkta ortalama (gated averaging) olarak çalışıyorsa en iyidir, çünkü sadece prob üzerindeki butona basıldığında ortalama alınır. Bu şekilde; operatör probu yüzeye dik tutmaya ve yavaşça, kararlı hızda ilerletmeye konsantre olur. Yüzey tamamen taranabilir. Tarama işi bittiğinde operatör butonu basarak ortalamayı bitirir. Dolayısıyla analizör üzerinde seçilmiş olan ortalama zamanında, tarama zorunluluğu olmaz. Kabul edilebilir tarama hızları 0.1 - 3 m/s arasındadır, fakat genelde kullanılan hız kabaca 0.5 m/s'dir. Bu yöntemle 1 m²'lik alan yaklaşık 32 sn'de taranabilir. Kaplama zeminli bir oda içinde küçük bir cihazın toplam test süresi 160 sn olabilir.



Şekil 3.12 Sabit nokta ve yüzey tarama

3.4.5.8 Yüzey Ses Şiddet Düzeyinin Hesaplanması

Tüm ölçüm yüzeyi üzerinden ortalaması alınmış ses şiddet düzeyi aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanır.

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (3.34)$$

- N : Alt ölçüm yüzeylerinin sayısı
 S_i : i. alt ölçüm yüzeyinin alanı
 I_i : S_i yüzeye dik olan i. şiddet bileşeni
Yüzey şiddet düzeyi

$$L_I = 10 \log \left(\frac{|I|}{I_0} \right) \quad (3.35)$$

ifadesinden hesaplanır.

- L_I : Yüzey ortalama şiddet düzeyi
 $|I|$: Yüzey ses şiddetinin mutlak değeri
 I_0 : Referans şiddet düzeyi, 1 pW/m²

3.4.5.9 Ses Güç Düzeyinin Hesaplanması

Toplam ses güç düzeyi, yüzey ortalama şiddet düzeyi ve I toplam yüzey S 'den

$$L_W = L_I + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (3.36)$$

ifadesi ile hesaplanır. Tüm ölçümler A-ağırlıklı olarak yapıldığında L_W yerine L_{WA} kullanılır.

3.4.5.10 Test Raporu

Gürültü güç araştırması ile ilgili bir raporda aşağıdaki bilgiler olmalıdır:

- Test edilen cihazın adı, model numarası, seri numarası ve boyutları,
- Monte ve çalışma şartlarının açıklanması,
- Test ortamının fiziksel boyutlarını da içerecek şekilde, çevreleyen yüzeyin akustik özellikleri, yüzey ses basınç seviyeleri, sıcaklık, ortam basıncı,
- Kullanılan ölçüm cihazlarının modeli, seri nosu, üreticisi, analizörün band genişliği, frekans cevabı, probun geometrisi ve son performans kontrolü,

- Alan kalibrasyonu ve kontrolu, örnekleme tekniği veya tarama tekniği, ölçüm yüzeyinin ölçüsü, şekli ve konumu.

- A-ağırlıklı ses güç düzeyi L_{WA} , dB re 1 pW.
- 1/3 oktav bantlarda ses güç düzeyleri L_W , dB re 1 pW.
- Tarih ve ölçümün yapıldığı yer.
- Ölçümü yapan kişinin adı.

4

SES FİZYOLOJİSİ, GÜRÜLTÜ İLE OLUŞAN İŞİTME KAYIPLARI VE KORUNMA YÖNTEMLERİ

4	SES FİZYOLOJİSİ, GÜRÜLTÜ İLE OLUŞAN İŞİTME KAYIPLARI VE KORUNMA YÖNTEMLERİ	4.3
4.1	Giriş	4.3
4.2	İnsan Kulağı ve Sesin Algılanması	4.3
4.3	İnsan Kulağının İşitme Sınırları	4.5
4.4	Çalışma Yerindeki Gürültünün İnsan Üzerinde Etkisi	4.8
4.4.1	İşitme Sistemine Etkiler	4.8
4.4.2	Fonksiyonların Engellenmesi ile İlgili Etkiler	4.12
4.4.3	Psikolojik Etkiler	4.13
4.4.4	Fizyolojik Etkiler	4.14
4.5	Gürültü'den Korunma Yöntemleri	4.14
4.5.1	Teknik Koruyucu Önlemler	4.14
4.5.2	Tıbbi Koruyucu Önlemler	4.16
4.5.3	Organizasyona Ait Önlemler	4.18

SES FİZYOLOJİSİ, GÜRÜLTÜ İLE OLUŞAN İŞİTME KAYIPLARI VE KORUNMA YÖNTEMLERİ

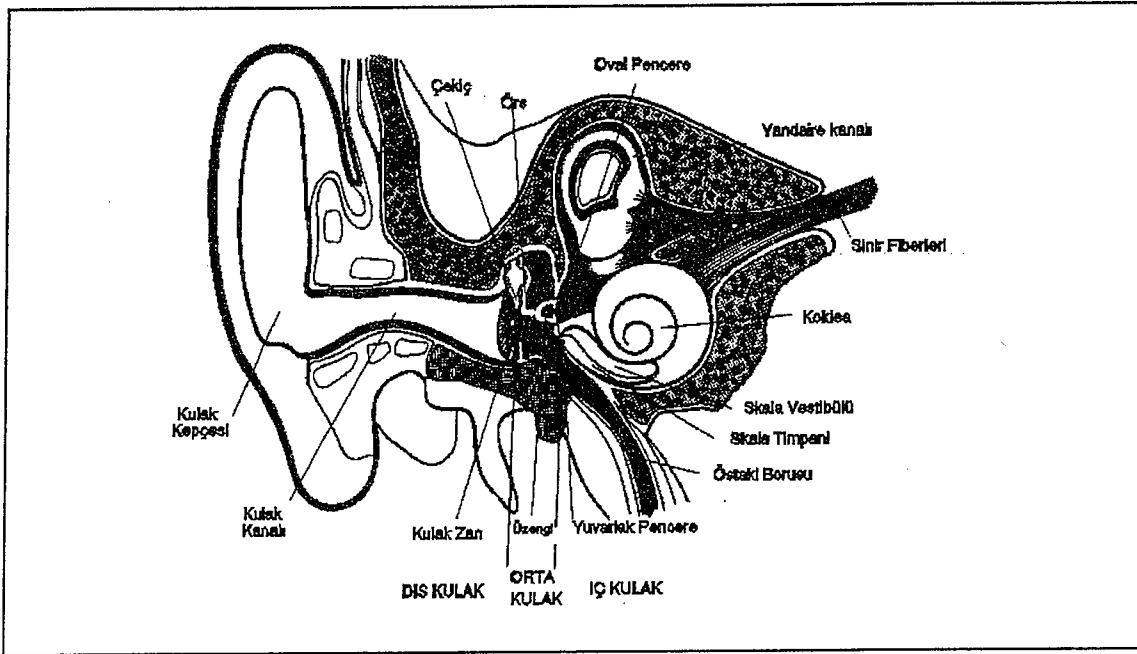
4.1 Giriş

Ülkemiz endüstrisinde, en sık rastlanan meslek hastalığı, gürültü ile oluşan işitme kayıplarıdır. Meslek hastalıkları istatistikleri konusunda tek kaynak olan S.S.K. İstatistik yıllıklarında, çok fazla rastlanmayan endüstriyel işitme kaybına sahip insan sayısının, son yıllarda yapılan çalışmalardan, 20000'i aştığı rahatlıkla görülebilmektedir [10]. Endüstriyel açıdan çok önemli bir sağlık riski oluşturan gürültü, genel halk sağlığı açısından da önemli bir sağlık sorunudur. Özellikle İstanbul'un değişik semtlerinde, yapılan uzun süreli ölçümlerde bütün değerlerin " Gürültü Yönetmeliği" 'nde müsaade edilen değerleri geçtiği görülmektedir. İnsanların en çok sessizliğe ihtiyacı olduğu hastanelerin yoğun bakım ünitelerinde bile ölçülen değerler, son derecede yüksektir. Yüzyılımızın baş derdi olan gürültü için yıllar önce Robert Koch'un söylediği sözler hak vermemek mümkün değildir. "Kolera ve Veba gibi hastalıklarda olduğu gibi, Gürültü ile mücadele edeceğimiz yıllar yakındır". İşte bu günler gelmiş ve geçmektedir, fakat insanlık, bu bela ile yeteri kadar mücadele etmemektedir.

4.2 İnsan Kulağı ve Sesin Algılanması

İnsan kulağı dış kulak, orta kulak ve iç kulak olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Kulağa gelen ses dalgaları dış kulak öğeleri kulak kepçesi ve kulak kanalı yardımıyla kulak zarına doğru yönlendirilirler. Ses dalgalarının oluşturduğu ortam basıncı üzerindeki dalgalanmaları kulak zarının titreşimine neden olurlar. Zarin titreşimleri orta kulaktaki çekiç, örs ve üzengi adı verilen üç küçük kemikten oluşan manivela türünden mekanik bir düzenek aracılığı ile iç kulağa iletilir. İç kulak, salyangoz şeklindeki koklea ve buna bağlı yarım daire kanallarından oluşur. Her kulakta üçer adet bulunan yarım daire kanallarının birinci görevi insan dengesinin sağlanmasına

yönelik olup, işitme ile pek ilgisi yoktur. Koklea, iki buçuk devir yapan bir spiral şeklinde açıldığında uzunluğu 32-35 milimetreyi bulan, kulağın en hassas ve önemli kısmıdır. İçi sıvı dolu olan koklea bir zar tarafından, spiralin ortasından irtibatlı iki ayrı kanala ayrılır. Orta kulaktaki kemikler aracılığıyla gelen titreşimler kokleanın oval pencere denilen kısmına iletilirler. Oval pencerenin titreşimi sonucunda, koklea içindeki sıvıya bir dalga hareketi verilmiş olur. Kokleayı uzunluğuna iki kanala ayıran zar üzerinde ortalama 35 tüy hücre taşıyan korti organına da yataklık etmektedir. Koklea içindeki sıvıda oluşturulan dalgalar uzunluğu 6-7 mikron dolayında olan bu hücreler yardımıyla algılanırlar ve tüylerin hareketiyle orantılı olarak elektrik sinyaline dönüştürürler. Tüy hücreleri bireleşerek sayıları yaklaşık 16 bin dolayındaki sinir liflerini, bunlar da duyma ya da işitme sinirlerini oluştururlar. Böylelikle dış kulağa gelen ses dalgalarının değişimden geçerek korti organından oluşturduğu sinyaller, işitme sinirleri yoluyla beyindeki işitme merkezine taşınır ve sinyallerin bu merkezde işlem görmesiyle duyma süreci tamamlanır. Şekil 4.1 duyma işlemi ile ilgili olan kulak öğelerini göstermektedir.



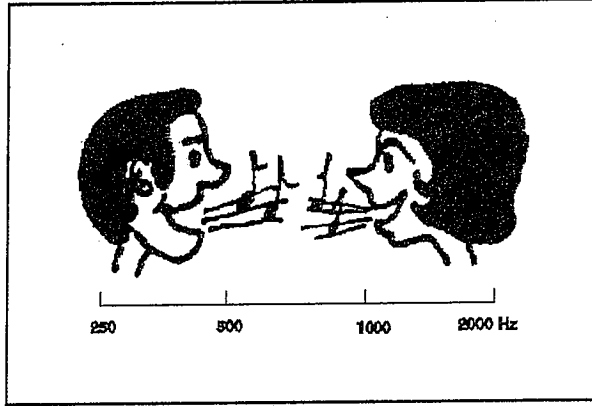
Şekil 4.1 Kulağın yapısı

Duyuma işlemleri çok daha küçük ölçekte de olsa doku yoluyla gerçekleşebilmektedir. Yüz ve kafatasındaki doku ve kemiklere çarpan havadaki ses dalgaları bu iki ortamda da yayılan dalgalara neden olmaktadır. Bu dalgaların kafatasındaki oyuklara yerleşik iç kulağa ulaşmasıyla da seslerin algılanması mümkün olabilir. Bu nedenle dış kulak kanalı kulak tıkaçlarıyla kapatılarak orta ve iç kulağın dış ortam ile ilgisi kesilse bile, insanlar bu yolla havada yayılan sesleri az da olsa algılayabilirler.

Kulak ve duyma sistemi seslerin frekanslarını ayırtıran bir özellik ile donatılmıştır. Bu özellik iç kulaktaki koklea'nın yapısı ile ilintilidir. Örneğin, tiz sesler oval pencere yakınındaki tüy hücreleri, pes ya da bas sesler ise koklea'yı ikiye ayıran zarın ucuna yakın bölgedeki tüy hücreleri yardımıyla algılanırlar. Bu bağlamda duyma sistemi bir frekans analizörü ya da çözümleyicisi olarak çalışmaktadır. Gürültü ve ses ile ilgili olarak geliştirilen standartlarda ve gürültü denetimi çalışmalarında kulağın bu özelliği dikkate alınmaktadır.

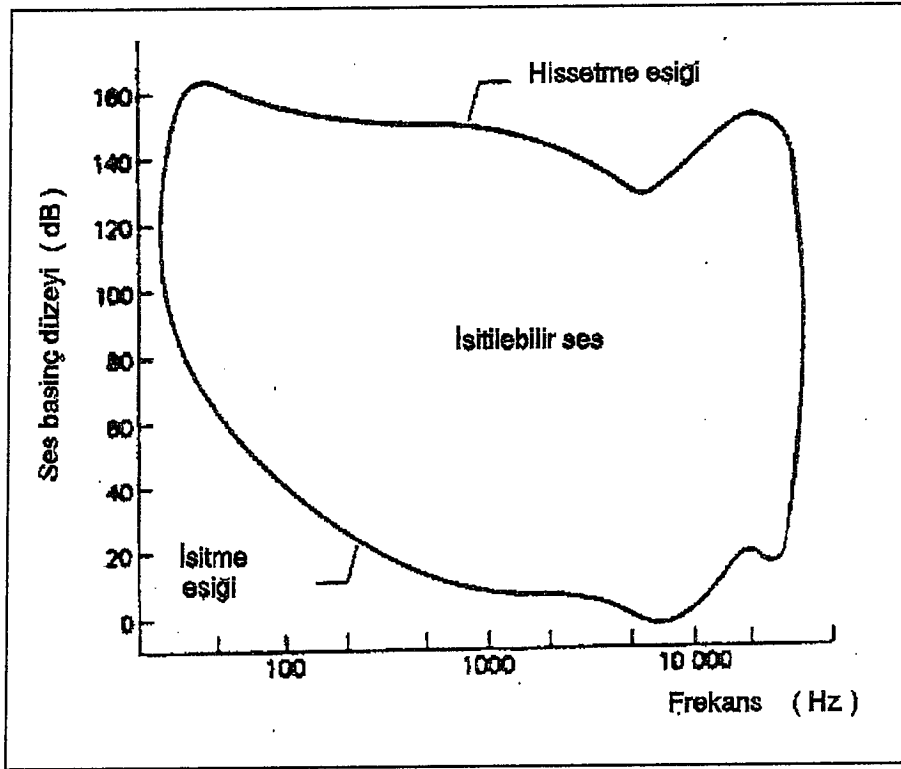
4.3 İnsan Kulağının İşitme Sınırları

Çok sayıda insan üzerinde yapılan denemelerin istatistiksel sonuçlarına göre insan kulağı frekansları 20 Hz - 20 kHz arasında olan sesleri işitebilmektedir. Bu nedenle, bu türdeki seslere "işitme sesi" denir. Deniz dalgaları, don, deprem, rüzgar sesleri gibi kulağımızın algılayamadığı 20 Hz'in altındaki seslere "sesaltı" (infrases), son zamanlarda hastalıkların tanı ve tedavisinde çok fazla kullanılan, 20000 Hz'in üzerindeki seslere de "sesüstü" (ultrases) denir. İnsan sesleri yaklaşık olarak 250 - 2000 Hz frekans aralığında yer almaktadır. Erkek sesleri daha düşük (250 - 500 Hz), kadın sesleri ise daha yüksek frekanslarda (1000 - 2000 Hz) yer almaktadır. Fakat, insanlar kendi istekleri ile ses bantlarının gerginliklerini değiştirerek ana titreşim frekanslarını 1 - 2 oktav kadar kaydırabilirler. Şarkı söyleyen ve şan yapan sanatkarlarda bu aralık daha büyük olabilir.



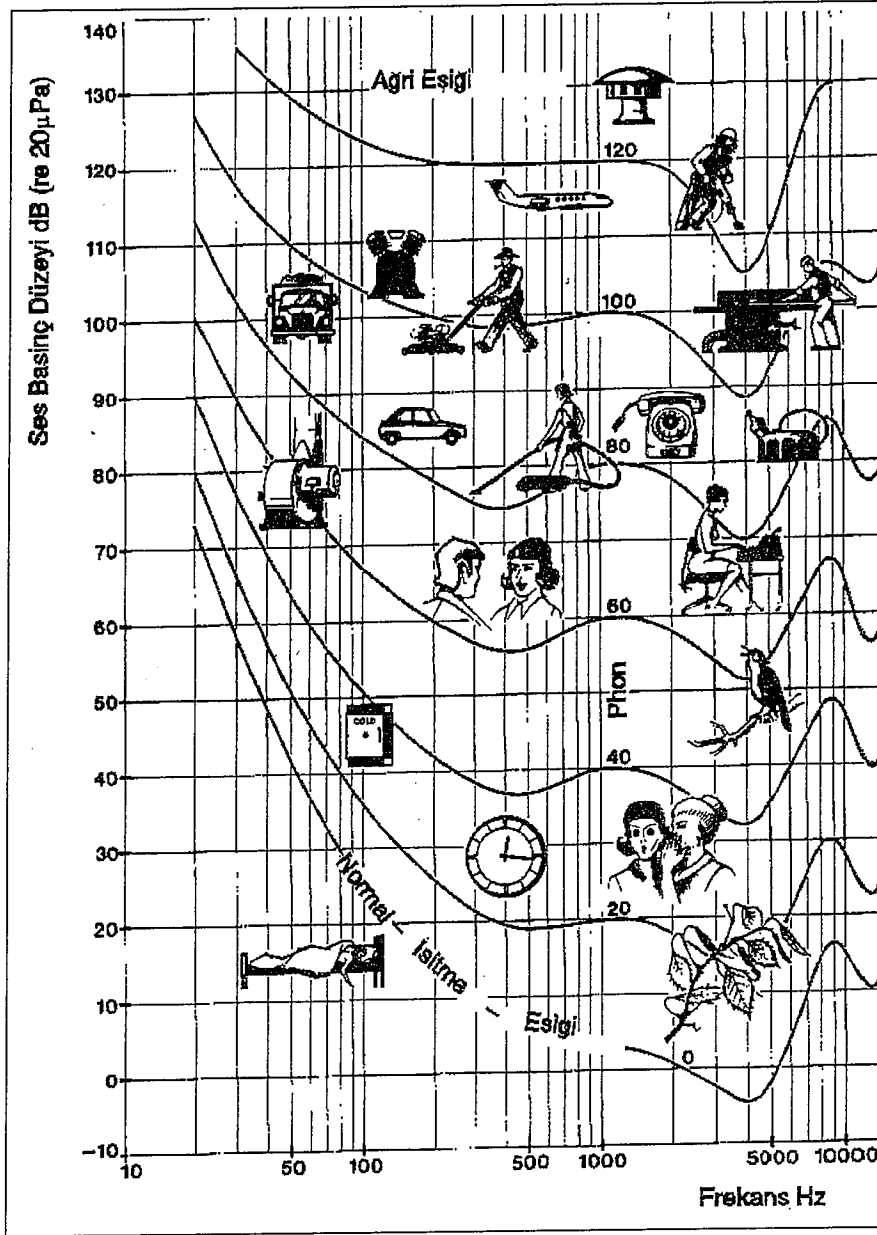
Şekil 4.2 Konuşma seslerinin frekans aralığı

Sesin işitebilmesi için, şiddetinin belli bir düzeye erişmesi gerekmektedir. Üstelik insan kulağı her frekanstaki ses'e ayrı duyarlılığı göstermemektedir. İşitebilir sesin kapsadığı bölge Şekil 4.3'de frekans-basınç düzleminde verilmiştir.



Şekil 4.3 İnsan kulağının işitme sınırları

Burada dikkat çekici olan insan kulağının işitme sınırlarının lineer olmayışdır.



Şekil 4.4 Genel gürültü kaynaklarının tipik ses basınç seviyeleri

Şekil 4.3' den görüldüğü gibi insan kulağı düşük ve çok yüksek frekanslı seslere karşı pek duyarlı olmadığı, buna karşılık 4000 Hz civarında frekanslara sahip seslere karşı aşırı duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 4.4' de bazı tipik ses basıncı ve ses yüksekliği düzeyleri görülmektedir. Bu şekil Bölüm 1'de tanımladığımız Phon biriminin temsil ettiği ses yüksekliği düzeyi hakkında ve bu seslerin insan üzerindeki etkisi hakkında somut bir fikir edinilmesine olanak vermektedir.

4.4 Çalışma Yerindeki Gürültünün İnsan Üzerinde Etkisi

Günümüzde bir çevre ve sağlık sorunu haline gelen gürültünün insanlar üzerindeki olumsuz etkileri

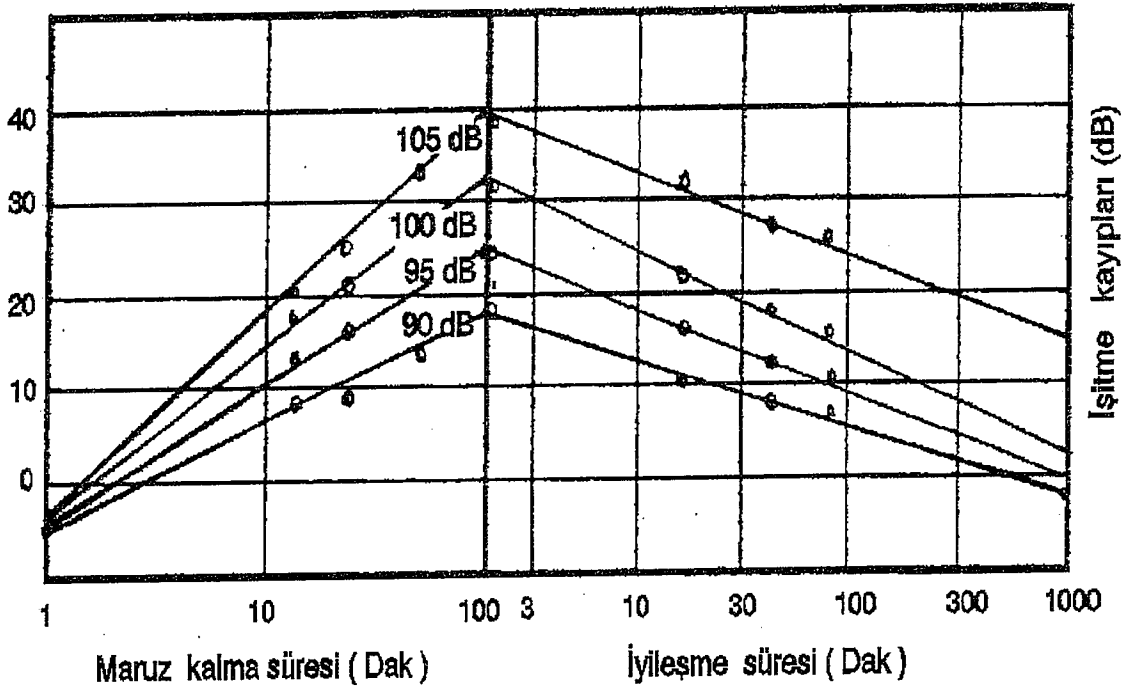
- İşitme sistemi öğelerinin fiziksel hasar görmesi ile ilgili etkiler,
- İş verimliliğinin ve üretkenliğinin azalması, neden olduğu iletişim sorunları ile ilgili etkiler,
- Yorgunluk ve sinirlilik hali türünden getirdiği etkiler,
- Vücudun fizyolojik davranışında oluşturduğu değişikliklerle ilgili etkiler

başlıkları altında toplanabilir. Bu bölümde sözü edilen etkiler konusunda bilgi verilecektir.

4.4.1 İşitme Sistemine Etkiler

Gürültünün işitme sistemine etkileri geçici ve kalıcı olarak iki ayrı bölümde incelenebilir. Geçici etkilerden en çok karşılaşılanı geçici işitme (duyma) eşiği kayması veya duyma yorulması olarak bilinen işitme duyarlılığındaki geçici kayıptır. Frekansa bağlı olarak verilen işitme kaybının miktarı, her frekansdaki eşik kaymasına

eşit olarak tanımlanmaktadır. Yüksek gürültü düzeylerinin (90 dB (A)'nın üzerindeki sesler) kısa süre etkisinde kalan kişilerde gürültünün ortadan kalkmasından sonra işitmede bir duyarsızlık hissedilir ve hemen arkasından kulakta çınlamalar duyulmaya başlanır. Etkilenimin süre ve gürültü düzeyi açılarından çok fazla olmadığı durumlarda, kişi daha sessiz bir ortamda dinlendirildiği zaman işitme sistemi etkilenimden önceki durumuna tamamiyle kavuşabilir. Etkilenimin çok fazla olduğu ve işitme sisteminin eski özelliklerine kavuşmadan tekrar gürültüden etkilendiği durumlarda işitme kaybı kalıcı olmaktadır. Örneğin geçici işitme kayıplara ilişkin iyileşme süreleri Şekil 4.5'de gösterilmektedir.

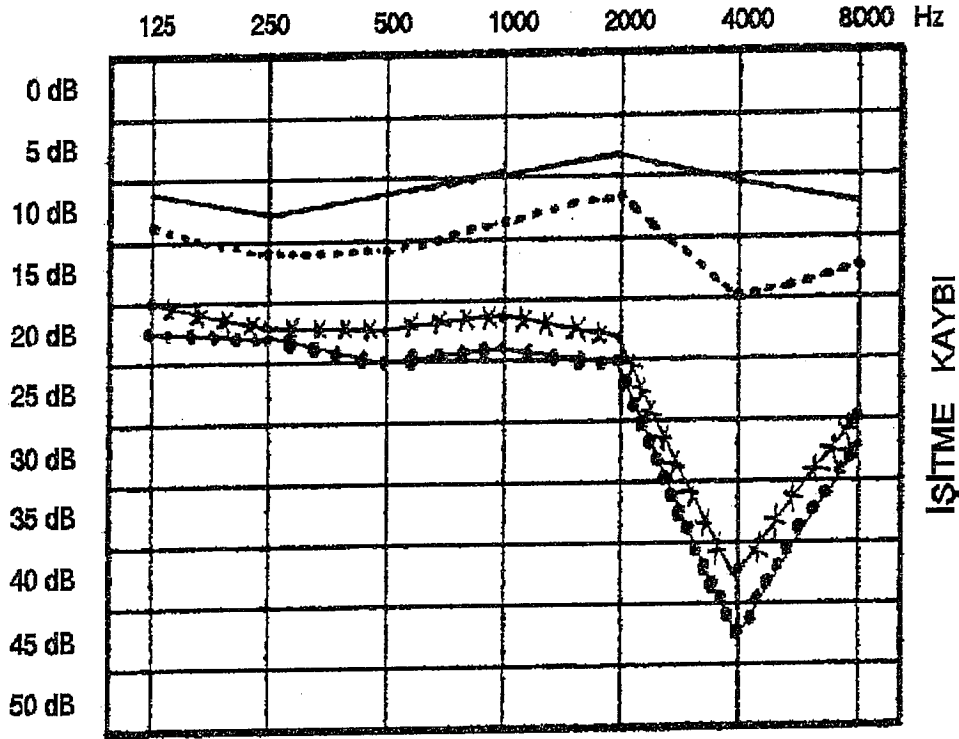


Şekil 4.5 Değişik gürültü düzeylerine maruz kalmada oluşan geçici işitme kayıpları ve iyileşme süreleri

90 dB (A)'lık bir gürültüye 100 dakika maruz kalma sonucunda ortaya çıkan yaklaşık 18 - 20 dB'lik bir işitme kaybının ortadan kalkabilmesi için gerekli olan iyileşme süresi yaklaşık olarak 1000 dakikadır, yani ortaya çıkan işitme kaybının iyileşebilmesi için,

maruz kalma süresinin 10 katı kadar bir iyileşme süresine ihtiyaç olduğu ortadadır. Gürültü düzeyi arttıkça, oluşan işitme kaybının arttığı ve iyileşme süresinin ise daha fazla arttığı aynı şekil'den rahatlıkla görülmektedir.

Gürültülü ortamlarda çalışan insanların yukarıda bahsi geçen iyileşme sürelerine sahip olması özellikle endüstride mümkün değildir. 8 saatlik bir maruz kalma sonucunda en fazla 16 saatlik bir dinlenme süresine sahip çalışanlarda bu işitme kayıpları, yığılmalı bir biçimde oluşarak sürekli işitme kayıplarını oluştururlar.



Şekil 4.6 Farklı gürültü düzeylerine, farklı sürelerde maruz kalan işçilerde oluşan sürekli işitme kayıpları

(____) 31 kişilik, 85.66 dB(A)'lık gürültüye, 20.96 ay maruz kalmış,
 (-----) 20 kişilik, 95.56 dB(A)'lık gürültüye, 24.05 ay maruz kalmış,
 (x x x x) 21 kişilik, 95.56 dB(A)'lık gürültüye, 80.85 ay maruz kalmış,
 (.....) 14 kişilik, 95.56 dB(A)'lık gürültüye, 166.71 ay maruz kalmış
 kişilerin işitme kayıplarını farklı frekanslarda göstermektedir.

Çok uzun süre işitme reseptörleri üzerine gelen bu fiziksel enerji, bu reseptörlerin bozulmasına, yani sinirsel iyileşemez tüpte işitme kayıplarına neden olurlar. Yukarıda bahsedildiği gibi insan kulağının en hassas işitmeye sahip olduğu frekans bölgesi 4000 Hz'lik frekans bölgesidir. Bu nedenle aşırı gürültüye maruz kalma sonucu ortaya çıkan işitme kaybı, en önce 4000 Hz'lik frekans bölgesinde oluşur ve diğer komşu frekanslara doğru maruziyet süresi arttıkça devam eder. Yani 4000 Hz'lik frekans bölgesinden sonra ilk etkilenen işitme frekansları 3000 ve 2000 Hz'ler ile 6000 ve 8000 Hz'lerdir. Dolayısıyla gürültünün oluşturduğu işitme kayıplarında, işitme düzeyinin saptandığı konuşma frekansları diye isimlendirilen işitme frekansları, daha sonra etkilenmektedir. Bu özellik bizlere konuşma frekansları etkilenmeden önce, gürültü ile oluşan işitme kayıplarının erken teşhisinde ve korunmada önemli bir olanak sağlamaktadır.

İşitme kaybının kalıcı ya da geçici olması ve kaybın derecesi, etkisinde kalınan gürültünün düzeylerine, frekans içeriklerine ve etkilenim süresine bağlı olmakla birlikte kişisel duyarlılıkta önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar erkeklerin kadınlardan daha fazla işitme kaybına uğrayabildiklerini göstermiştir. Ayrıca erkekler yüksek frekanslarda en fazla kalıcı işitme kaybına uğrarken, kadınlar her frekansta daha az ve eşit miktarda işitme kaybına maruz kalabilmektedirler. İnsan kulağının duyarlı olduğu 1000 Hz ile 6000 Hz arasındaki frekanslarda baskın ses enerjisi bulunan gürültü düzeyleri, daha fazla işitme kaybına neden olmaktadır. Yüksek frekansları algılayan tüy hücreleri daha kolay hasar gördüklerinden, geniş kuşak türü gürültünün etkisinde kalan kişilerde eşik kaymaları ve işitme kaybı, yüksek frekanslarda daha çok olacaktır. Patlama türü gürültünün etkisinde kalan kişilerde bu durum belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

Yaşlanma nedeniyle oluşan işitme kaybı (tıbbi terminolojide **Presbycusis** olarak bilinir), artan yaş ile orantılı olarak artan işitme kaybında hızlanma ve yüksek frekanslarla orantılı olarak artan işitme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Kişilerin

etkisinde kaldıkları gürültünün değerlendirilmesinde, kişinin yaşına bağlı olarak hesaplanabilen yaşlanma ile oluşan işitme kaybı için düzeltme yapıldıktan sonra gerçek değerlendirme yapılabilir.

Kişilerde oluşan işitme kaybı odyometre adı verilen cihazlarla ölçülerek saptanır. Ölçümler sonucunda her kulak için ayrı ayrı elde edilen ve odyogram adı verilen grafik ya da çizelge şeklinde frekansa bağlı olarak gösterilen değerler, iki kulaktan algılanan ses için o anda belirlenen duyma eşiklerini ifade ederler. Yaşlanma ile oluşan eşik kayması ya da işitme kaybının etkisi bu değerlerden çıkarıldıktan sonra, kişinin uğramış olduğu gerçek işitme kaybı genellikle her oktav kuşağı için belirlenebilmektedir. Hastanelerde ve kulak hastalıkları uzmanlarında bulunan bu cihazlarla, gürültülü ortamlarla içiçe yaşayan kişilerin duyma eşiğindeki değişimlerin periyodik olarak izlenmesi ve olası işitme kayıplarının belirlenebilmesi mümkün olmaktadır.

4.4.2 *Fonksiyonların Engellenmesi ile İlgili Etkiler*

Etkisinde kalınan gürültü nedeniyle belli bir frekans aralığında oluşan kalıcı işitme kaybı diğer frekanslardaki seslerin duyulmasını ve algılanmasını engellemez, ancak bir takım fonksiyonların engellemesine neden olabilir. Buna en güzel örnek olarak işitme kaybının 2000 Hz dolayına ulaşmasıyla konuşmanın anlaşılabilirliğinde oluşacak aksaklıklar gösterilebilir. Konuşma frekanslarının baskın olan başlıcaları, erkekler için 350 Hz - 500 Hz, kadınlar için ise 700 Hz - 800 Hz aralığında bulunur. Konuşmanın anlaşılabilirliği ise 1500 Hz - 2500 Hz aralığında yer alan frekanslardaki ses bileşenleri ile sağlanmaktadır. Özellikle, 2000 Hz oktav kuşağında fazla işitme kaybının olduğu durumda konuşma duyulsa da anlaşılmaz. Yaşlanma ile oluşan işitme kaybının ileri boyutlara varması nedeniyle de konuşmanın anlaşılabilirliği etkilenmektedir.

Kişilerde oluşan kalıcı işitme kaybı, insanlar arasında gürültü nedeniyle doğabilen iletişim sorunlarından çok az bir kısmı ile ilgilidir. Konuşmanın algılanabilmesi ve anlaşılabilmesi türünden fonksiyonların engellenmesi, büyük ölçüde ortamda etkisinde kalınan arka plan gürültüsünün düzeyi ve frekans içeriği ile ilintilidir. Arka plan gürültüsünün özellikle konuşma frekanslarını içeren frekanslarda baskın bileşenlerinin bulunduğu durumlar, konuşmanın olumsuz yönde en çok etkileneceği örnekleri oluştururlar. Hem karşılıklı konuşmanın hem de telefon ile iletişimin sağlıklı yapılabilmesini sağlamak için arka plan gürültüsünün **konuşmayı engelleme düzeyi** adında bir ölçüt geliştirilmiştir. Arka plan gürültüsünün 500 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz oktav kuşaklarındaki düzeylerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanan konuşmayı engelleme düzeyi, bir yönetmelik şeklinde dönüştürülmemişse de, uygulamada belli mekanlarda oluşacak arka plan düzeylerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gürültünün iş verimliliği ve üretkenlik ile ilgili etkiler konusunda yapılan araştırmalar, karmaşık işlerin yapıldığı ortamların sessiz, basit işlerin yapıldığı ortamların ise biraz gürültülü olması gerektiğini göstermiştir. Ortamda yapılması istenen işler ve ortamın fonksiyonları verimli bir şekilde yürütülebilmesi için izin verilebilecek gürültü düzeylerinin sınırlarını belirlemek üzere uygulamada Gürültü Sınıflandırma (Avrupa ülkeleri) ve Gürültü Ölçütü (ABD ve Kanada) adlarında ölçütler geliştirilmiş; bunlara paralel olarak A-ağırlıklı düzeylerde de önerilmiştir. Özetle, ortamda bir iş ya da fonksiyon için belirlenen arka plan gürültüsünden fazla gürültü düzeylerinin etkisinde kalındığı durumlarda, iş verimliliği düşmektedir.

4.4.3 *Psikolojik Etkiler*

Bulunan ortamda, fonksiyonlar için belirlenmiş gürültü düzeylerini aşan gürültünün etkisinde kalan kişiler rahatsız, tedirgin ve sinirli olmakta, tedirginlik ve sinirlilik hali

gürültünün etkisi kalktıktan bir süre sonra devam edebilmektedir. Belirlenen düzeylerin aşıldığı durumlarda yorgunluk ve zihinsel etkinliklerde yavaşlama gözlenmektedir. Ani olarak yükselen gürültü düzeyleri korku yaratabilmekte, gürültüden etkilenim sürse bile daha sonra normale dönüş olmaktadır.

4.4.4 *Fizyolojik Etkiler*

Günümüzde gürültü kişilerde en önemli stres kaynaklarından biridir. Ani olarak yükselen gürültü düzeyleri kişilerin kalp atışlarında (nabızda), solunum hızında, kan basıncında, metabolizmasında, görme keskinliğinde ve hatta derisinin elektrik direncinde değişiklikler oluşturmaktadır. Bu etkilerin çoğu gürültüden etkilenim sürse bile, ortadan kalkmaktadır. Yüksek düzeyde gürültünün etkisinde kalan kişilerde, yüksek kan basıncı (yüksek tansiyon) olduğu ve bu durumun kalıcı olduğu yapılan gözlemlerle kanıtlanmış bulunmaktadır. Uykusuzluk, gürültünün neden olduğu rahatsızlıkların en önemlilerindendir. Ek olarak, gürültünün migren, ülser, kalp krizi, dolaşım bozuklukları türünden rahatsızlıklara neden olabileceği ileri sürülmekle birlikte, kulakta yaptığı tahribat dışında bu tür hastalıklarla doğrudan ilişkisi kanıtlanmış değildir [11].

4.5 **Gürültü'den Korunma Yöntemleri**

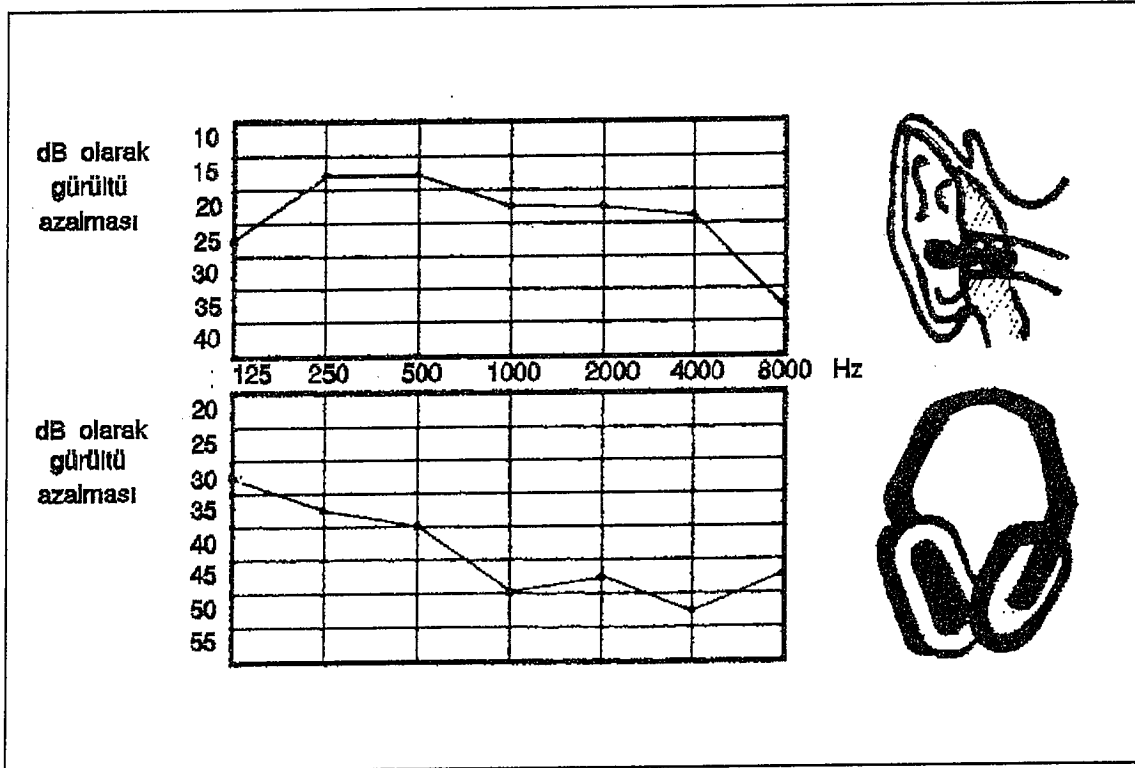
Gürültünün etkilerinden korunmada kullanılacak yöntemleri üç ana başlık altında toplayabiliriz.

4.5.1 *Teknik Koruyucu Önlemler*

Teknik koruyucu önlemleri de iki başlık altında toplayabiliriz:

a) Kaynakta ve çevrede alınabilecek teknik koruyucu önlemler: Bu önlemlerin en başında gürültünün ölçülmesi, makina başı izolasyon önlemleri veya çevrede alınabilecek izolasyon önlemleridir.

b) Kişisel koruyucu önlemler: Bu tip koruyucu önlemler gürültülü ortamda çalışan insanların gürültüden korunabilmesi için geliştirilen kulak tıkaçlarını ve kulaklıkları kapsamaktadır. Kulak tıkaçları, kulakta hava yolunu kapatan farklı özelliklerde olmak üzere yaklaşık 10 - 20 dB'lik bir avantaj sağlayan, piyasadan rahatlıkla temin edilebilen malzemelerdir. Kullanımı kolay olan 110 dB'lik bir gürültüyü işitme kayıpları için limit değer kabul eden 90 dB (A) altına düşürebilen bu cihazlar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Kulaklıklar ise, kulak arkası kemiğinin (Mastoid) kapatan bir yapıya sahip olduğundan özellikle kemik yolu ile iç kulağa iletilen seslerin izolasyonunda daha başarılı olmaktadır. 20 - 40 dB' lik gürültü azaltması avantajına sahip olan bu kulaklıklar, daha pahalı, ağır ve baş hareketlerini kısıtladıkları için, endüstride, kulak tıkaçlarına göre daha az sayıda kullanılmaktadırlar. Şekil 4.7'de her iki koruyucu cihazın kullanım şekli ile gürültünün azaltılması konusunda sağladıkları avantajı gösteren eğri görülmektedir.



Şekil 4.7 Kişisel işitme koruyucuları ve frekanslara göre gürültü azalması

Tıbbi koruyucu önlemleri de iki bölümde inceleyebiliriz.

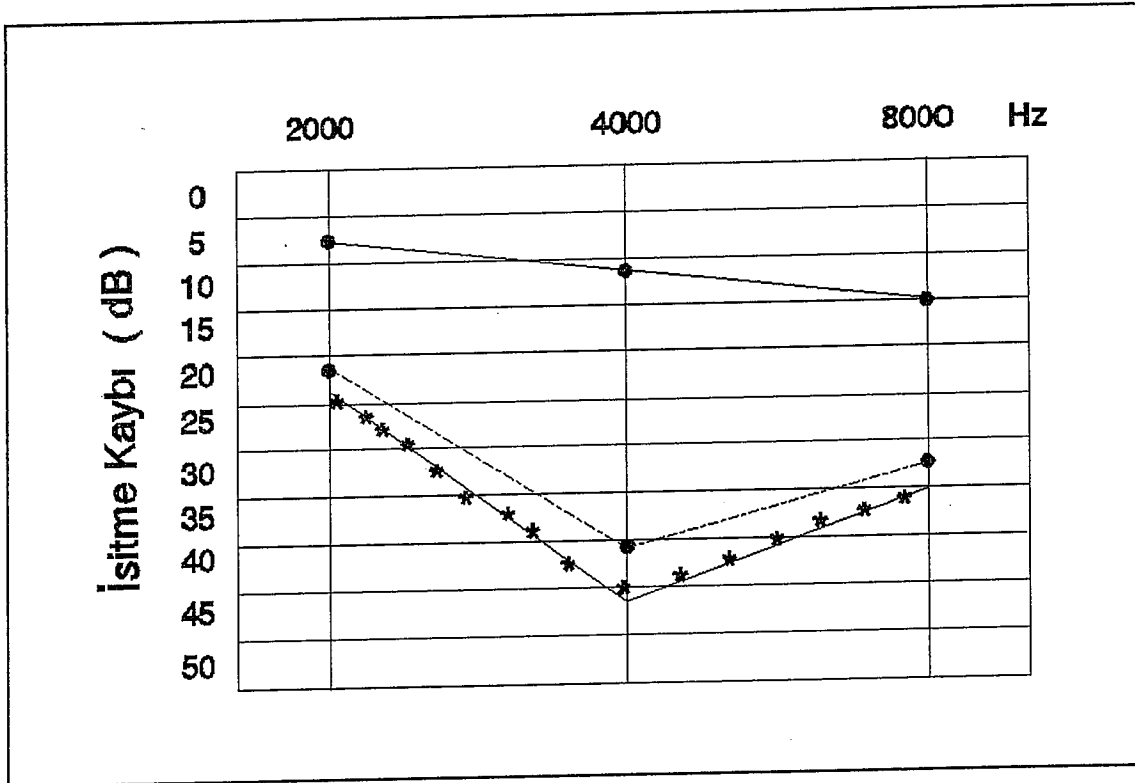
a) İşe giriş muayeneleri: Gürültü riski taşıyan işlerde çalışacak kişilerin işitmeleri tam bir odyometrik muayeneden geçirilmeli ve sağlık dosyasına konulmalıdır. Bu tür bir muayenede amaç, diğer risklerde olduğu gibi (örneğin hiperventilasyonlu bir kişinin tozlu ortamda çalışmasının önlenmesi gibi) kişinin o riskten daha çok etkilenmesinin önlenmesi şeklinde olmayıp, sonradan gelebilecek sağlık zararlarının, kişinin işe girerken ki durumu ile mukayesesini sağlamaktır. İşe giriş muayenesi sırasında kişide rastlanacak kısmi veya tam sağırılık hali, bu tür gürültülü işlerde, gürültüye bağlı işitme kayıplarının oluşmasında avantaj sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda bir kulağında iletim tipi bir kayba sahip bir kişinin sağır olan kulağının gürültüden etkilenmediğini, sağlam olan kulağının etkilenmediği görülmektedir. Bu nedenle gürültülü iş yerleri için sağır vatandaşların, özürlü kabul edilmeyip, özellikle aranması gereken çalışanlar olduğunu vurgulamak yerinde olacaktır.

b) Periyodik muayeneler: Bu tür muayenelerde tam bir odyometrik muayene yerine, tarama odyometrisi yöntemi kullanılır. 2000 , 4000 ve 8000 Hz'lik işitme frekanslarında yapılan bu odyometrik muayene, düşük frekansları kapsamadığından bir odyometrik oda gerektirmemekte sessiz sayılabilecek bir odada rahatlıkla yapılabilmekte ve son derecede kısa bir zaman diliminde şüpheli vakalar ayırtedilebilmektedir. Saptanan işitme düzeylerinden 4000 Hz'de, gürültüden oluşan ilk kaybın ne düzeyde olduğu; 8000 Hz'de yaşlanma ile oluşan işitme kaybının ne düzeyde olduğu; en önemlisi ise konuşma frekanslarının gürültüden ilk etkilenen frekansı olan 2000 Hz'de işitme düzeyinin ne durumda olduğu rahatlıkla görülebilmektedir.

Bu tarama odyometrisi ile saptanan ve gürültüden etkilendikleri anlaşılan kişiler kesin teşhis için tam bir odyolojik muayeneye alınarak, haklarında gerekli işlemler yapılmalıdır. Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.7'de tarama odyometrisine örnekler görülmektedir

Çizelge 4.1 Çeşitli işletmelerde incelenen grupların özellikleri

İŞLETMELER	GÜRÜLTÜ dB(A)	ÖRNEK SAYISI	ORTALAMA YAŞ (YIL)	ORT.ÇALIŞMA SÜRESİ
Dokuma fabrikası	85.66	31	24.06	20.96 ay
Kereste fabrikası	96.70	27	35.07	14.25 yıl
Cam eşya fabrikası	100.50	32	31.31	11.31 yıl



Şekil 4.8 Çeşitli işletmelerde çalışan kişilerde gürültü ile oluşan işitme

kayıpları.

4.5.3 *Organizasyona Ait Önlemler*

Gürültüden oluşan işitme kayıplarının belli dinlenme süreleri sağlanırsa önlenebileceği daha önce belirtilmişti. İşitme kayıplarının oluşmaması için limit değer olarak kabul edilen 90 dB (A) için maksimum çalışma süresi 8 saattir. Bu süre, bir grup standarda göre, maruz kalınan gürültü düzeyi 3 dB(A) arttığında yarıya inmekte, diğer bir grup standarda göre de maruz kalınan gürültü düzeyi 5 dB(A) arttığında yarıya inmektedir. Daha çok kullanılan standart gürültü düzeyi 5 dB(A) arttığında, maruz kalma sürenin yarıya inmesidir. Yani, gürültü düzeyi 95 dB(A) olduğunda, maruz kalma süresi 4 saat, 100 dB(A) olduğunda maruz kalma süresi 2 saat olmalıdır. Fakat bu yöntem tamamen kuramsal olup uygulamada tercih edilen bir yöntem değildir. Gürültünün zararlarından basit bir kulak tıkacı veya bir kulaklıkla korunmak dururken, çok pahalıya malolabilecek böyle bir önlemin alınması gerçek dışı bir olaydır. Ancak hiçbir kişisel korumanın alınamadığı haller için geçerli olabilir.

5

YAPILARDA GÜRÜLTÜ SORUNU VE DENETİMİ

5	YAPILARDA GÜRÜLTÜ SORUNU VE DENETİMİ	5.4
5.1	Giriş	5.4
5.2	Yapı Dışı gürültüleri	5.4
5.3	Yapı İçi Gürültüleri	5.5
5.4	Yapı Mimarisi - Kentsel Yerleşmeler	5.6
5.5	Gürültü Denetimi	5.7
5.6	Sesin Geçmesi	5.10
5.6.1	Sesin Cidar Titreşimi İle Geçmesi	5.10
5.6.2	Bileşik Cidar	5.12
5.6.3	Çift Cidar	5.13
5.7	Yapı Dışı Gürültülerin Denetimi	5.14
5.7.1	Dış Gürültü Ortamının Belirlenmesi	5.14
5.7.2	Yapı Kabuğuna Gelen Gürültü Düzeyini Etkileyen Etkenlerin Değerlendirilmesi	5.17
5.7.3	Gürültü Denetiminde Kabul Edilebilecek Fon Gürültü Düzeylerinin Belirlenmesi	5.18
5.7.4	Yapı Kabuğunun Gerekli Ses Geçirmezliğinin Belirlenmesi	5.19
5.7.5	Yapı Kabuğunun Ses Geçirmezliğinin Hesaplanması	5.20
5.8	İstenmeyen Akustik Olaylar İçin Ses Emici Malzemelerin Kullanımı	5.23
5.8.1	Sesin Emilmesi	5.23

5.8.2	Emiciliğe Tesir Eden Faktörler	5.24
5.8.3	Ses Yutucu Malzemelerin Sınıflandırılması	5.25
5.8.3.1	Gözenekli Malzemeler	5.26
5.8.3.2	Panel Yutucular	5.26
5.8.3.3	Boşluk ya da Helmholtz Rezonatörleri	5.27
5.8.3.4	Mekan Yutucuları	5.28
5.8.3.5	Değişken Yutucular	5.28
5.8.4	Ses Yutucu Malzemelerin Kullanım Yerleri	5.29

5.1**Giriş**

Günümüzde önemli bir çevre kirliliği sorunu olan gürültü, insanları tüm yaşamları boyunca etkilemekte ve türlü yönlerden istenmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, insan yaşantı ve eylemlerinin büyük bir bölümü yapıların içinde geçtiğine göre, yapılarda kullanıcıların konforunu bozan "gürültü" sorunu üzerinde önemle durulması ve çözüm yollarının getirilmesi, bir başka deyişle "gürültü denetimi" nin yapılması kaçınılmaz olmalıdır.

Yapılarda gürültünün belirgin bir sorun olarak ortaya çıkmasının temel nedenlerini ortaya koyarken konunun ;

- Yapı dışı gürültüleri (kent gürültüsü),
- Yapı içi gürültüleri,
- Yapı mimarisi-kentsel yerleşmeler

gibi değişik yönlerden ele alınıp incelenmesinde yarar vardır.

5.2**Yapı dışı gürültüleri**

Gürültü olarak nitelendirilen türlü sesler, değişik biçimlerde yapı dışında oluşarak kent gürültüsüne neden olmakta, bu gürültüler açık havada olan insanları etkilediği gibi çoğu zaman değişik yollardan yapı içlerini de etkilemektedir [7]. Yapı dışı gürültüleri genelde üç ana grupta toplanabilir:

- **Trafik ve Taşımacılık Gürültüsü:** Kent gürültüsü olarak en önemli

gürültü trafik ve taşımacılıkta kullanılan türlü araçlardan kaynaklanmaktadır. Hava ve deniz yolu araçlarının oluşturduğu gürültü bölgesel nitelik taşırken, karayolu taşımacılığın gürültüsü tüm kentte yaygın özellik gösterir . Bununla birlikte yol nitelikleri, araç nitelikleri ve hızları, yol-yapı konumları, yükseklikleri, topografik durum, baskın rüzgarlar, bitki-ağaç grupları, yeşil alanlar gibi etmenler karayolu trafik gürültü düzeyinin az ya da çok olmasında rol oynar.

- **Sanayi Gürültüsü:** Kent içinde çoğu kez bölgesel nitelik gösteren, fabrika, atölye, doklar, oto sanayi ve benzerlerinden çıkan gürültüler sanayi gürültüsünü oluşturur. Kent içinde konut yerleşim bölgelerinde yer alan küçük sanayi nedeniyle kaynaklanan gürültüler de söz konusudur.

- **Açık Hava Etkinlikleri Gürültüsü:** Spor alanları, açık pazarlar, çocuk bahçeleri, parklar, fuarlar, okul bahçeleri gibi insanların toplu olarak bulundukları alanlardan, yol, yapı ve benzerlerinin yapımı ve onarımlarından kaynaklanan gürültülerdir. Bu gibi alanlarda genellikle insanlar kendi çıkardıkları seslerle ya da birlikte kullandıkları araçlarla gürültü oluştururlar.

5.3 Yapı İçi Gürültüleri

Türlü biçimlerde yapı içinde ortaya çıkan gürültüler de üç grupta toplanabilir.

- **Yapıların İşlevlerine Bağlı Gürültüler:** Yapılarda kullanım amaçlarına yönelik araç, gereç, makine, motor ve benzerlerinden kaynaklanan gürültüler.

- **Yapı Döşemleri ve Teknik Donatıların Gürültüsü:** Yapılarda elektrik, pis su-temiz su gibi döşemlerden, asansör, havalandırma, ısıtma, soğutma gibi donatılardan kaynaklanan gürültüler.

- **İnsan Gürültüleri:** Yapı kullanıcılarının türlü nedenlerle istemli ya da istemsiz olarak çıkarttıkları gürültüler, örneğin, bağırıp-çağırma, eşyaları itip-çekme, yüksek düzeyde radyo, TV ve benzeri şeylerin dinlenmesi gibi.

5.4 Yapı Mimarisi - Kentsel Yerleşmeler

Günümüzde gürültünün önemli bir sorun olmasının temel nedenlerinden biri, kuşkusuz tarihsel gelişim süreci içinde yapıların mimarisinde ve kentsel yerleşimlerde ortaya çıkan değişikliklerdir. Yapım teknolojisinin dolayısıyla yapılarda kullanılan gereçlerin ve taşıyıcı sistemin değişimi, sanayileşme ve hızlı kentleşme bunda önemli rol oynamaktadır.

Çoğunlukla kırsal alanda yeralan tek ya da az katlı, ağır, kalın duvarların-döşemelerin kullanıldığı yığma yapılarda gerek dış, gürültülerin yapı içini etkilemesi, gerekse yapı bölümleri arasındaki ses geçişleri sorun olmazken, iskelet sisteminin ortaya çıkması ve yapıda taşıyıcı ve taşıyan öğelerin ayrılmasıyla yapılar hafiflemiş, pencere alanları büyümüş, çok katlı ve giderek giydirme cepheli yapıların uygulama alanına girmesiyle, yapı kabuğu aracılığı ile dış gürültülerinin yapı içini daha fazla etkilemesi ve ayrıca yapı bölümleri arasında da ses geçişlerinin rahatsız edici durumu ortaya çıkmıştır.

Çok katlı yapılarla birlikte asansör, hidrofor, boyler ve benzeri teknik donatıların kullanıma girmesi ve yaygınlaşması, ayrıca, yapılarda teknolojinin gelişmesi ve sanayi ürünlerinin artmasına koşut olarak, radyo, TV, yıkayıcılar, kurutucular, karıştırıcılar gibi her türlü elektrikli araç-gerecin kullanılması, yapı içi gürültüsünün artmasına neden olan bir başka etkidir. Bu tür yerleşmeler ulaşımdaya yaya-araç trafiği yönünden ve kullanıcı sayısı yani, nüfus artışı ve kimi zaman da yapı yüzlerinden olan yansımalarından ötürü gürültü düzeyinin artmasına neden olmaktadır. Eski kent

bölgelerinden ise, yine yoğun yerleşmeler, trafik, dar yollar, küçük sanayi kuruluşlarının olması nedeniyle zaten gürültü düzeyi oldukça yüksektir.

Görüldüğü gibi kentlerin dün ve bugün karşılaştırıldığında, yapı ve yerleşmeler yönünden yaşanan bu süreçte ters bir durum izlenmektedir. Sanayileşme ve kentleşmenin belirgin bir biçimde ortaya çıkmadığı, yani yapı dışı ve yapı içi gürültülerin etkin olmadığı dönemde, yapılar gürültüye karşı daha korunumlu iken, gürültü düzeylerinin oldukça arttığı günümüzde yapılar gürültüye karşı zayıf kalmakta, dolayısıyla gürültü sorunu etkin bir biçimde kendini hissettirmektedir. Kuşkusuz çağdaş yaşam gereği yeni teknolojileri, araç-gereç ve ürünleri kullanmak kaçınılmazdır. Ancak, bunların neden olduğu sorunların çözülmesi yine çağdaş yaşamın bir başka gereğidir ve onun koşullarının yerine getirilmesi gerekir. Bu da ancak konuya tüm ayrıntılar ele alınarak planlı bir biçimde yaklaşmakla olanaklıdır.

5.5 Gürültü Denetimi

Gürültü denetiminin etkin ve ekonomik olabilmesi için belirli bir sisteme ve planlamaya göre yapılması gerekir. Bu denetimin bir bölümü bilimsel ve teknik yönden konuya yaklaşmak, bir bölümü ise insanları bilinçlendirmek, ayrıca yasa ve yönetmeliklerle yaptırım ilkelerini gerektiği gibi uygulamaktır [12].

Denetimde temel ilkelerin başında, gereksiz olan türlü gürültü kaynaklarının oluşturulmasını önlemeye çalışmak gelmelidir. Çünkü bu denetimde en etkin ve ekonomik yoldur. Eğer gürültü zorunlu olarak çıkıyorsa o zaman aşamalarla bunu etkisiz duruma getirme çabaları harcanmalıdır. Burada uç aşama söz konusudur.

- **Gürültünün Kaynakta denetimi:** Bu, gürültü çıkartan kaynak ya da kaynakların niteliklerine bağlıdır. Yapı içi ve yapı dışı gürültüleri olarak, gürültüyü

olabiliyorsa kaynağında yani, çevreye türlü biçimlerde yayılmadan önlemek ya da azaltmak, ilk aşamada önem taşıyan en etkin ve çoğu kez en ekonomik yoldur.

- **Gürültünün Kaynakla-Alıcı Denetimi:** Gürültü kaynakta azaltılamıyorsa ya da yeterli değilse veya türlü nedenlerden ötürü kaynakta denetim yapılamıyorsa, bu kez gürültünün yayılma ortamında (havada ya da katılarda) başka bir değişle, kaynakla alıcı arasında denetim yapılması gerekir. Doğaldır ki bu denetim biçimi her türlü kaynak için geçerli değildir. Bu tür denetimde kaynak ve kaynağın bulunduğu çevrenin (yapı içi - yapı dışı gibi) özelliği önem taşır.

- **Gürültünün Alıcıda Denetimi:** Yukarıdaki iki aşama ile yeterli düzeyde denetim sağlanamıyorsa ya da hiç bir biçimde gürültünün azaltılması söz konusu değilse, o zaman denetimin alıcıda yapılması gereği doğar. Bu da değişik niteliklerdeki kulak koruyucularının kullanılmasıyla sağlanır.

Bu üç aşamada koşullara göre, denetimde konuya iki temel açıdan yaklaşmak gerekir. Biri, teknik açıdan, yani mühendislik, mimarlık, kent planlama uygulamalarıyla denetim. Öteki ise, daha çok birinci yolla yeterli koşullar sağlanamadığı zaman söz konusu olan, yönetimle ilgili, denetim, örneğin, yasaklamalar, süre sınırlamaları ve benzerleri gibi.

Burada birinci yolun çok daha önemli olduğunu vurgulamak gerekir. Çünkü, özellikle ağdaş yaşamın bir gereği olan bilim ve teknolojinin ortaya koyduğu ürünlerin ve yoğun kentleşmenin getirdiği gürültü sorununun, yine bilim ve tekniğe dayalı olarak çözümlenmesi konuya daha doğru bir yaklaşım olur.

Bu üç aşamadan ilk ikisi gerek yapı içi gürültülerin, gerekse yapı dışı gürültülerin denetlenmesi yönünden önem taşır. Yapılarda gürültü denetiminde eğer dış gürültünün etkinliği önemli ise, örneğin trafik gürültüsünün yapıları etkilemesi gibi, o

zaman yapı kabuğunun ses geçirmezliği ön planda gelir. Dış gürültü düzeyi ve yapının işlevine göre bu kabuğun (duvarlar + çatı) niteliği, yani nasıl olması gerektiği belirlenmelidir. Aslında, kentsel planlama aşamasında konut yerleşim alanları, okullar, yollar, sanayi bölgeleri, hastaneler, yeşil alanlar ve benzerleri gürültü yönünden doğru planlanmışsa ve gerekli önlemler alınmışsa, genel olarak yapıların büyük bir çoğunluğu için yapı kabuğunda önlem alınması yani gürültü denetimi gerekmez. Ancak, genelde eski kentlerin plansız büyümesi, insan, taşıt yoğunluğunun artması, yeni yollar açılması, konut alanları ile sanayinin iç içe olması nedeniyle kentlerin büyük bir kısmında dış gürültü sorun olduğu için günümüzde yapılar için denetim gerekmektedir.

Yapı içi gürültülerin yapı ile ilgili denetiminde katlar arası döşemeler, bitişik hacimler arası duvarlar ya da bölmeler önem taşımaktadır. Yapıların işlevine, gürültülerin niteliğine göre bu yapı öğelerinin sesgeçirmezliklerinin yeterli düzeyde sağlanması gerekir.

Yapı içinde titreşim yapan araç-gereç, makine-motor gürültülerinin denetiminde ise, hem havada hem de katlarda yayılan seslerin ve titreşimlerin özelliklerine göre önlemler alınmalıdır.

- **İnsan Etkeni:** Yukarıda temel ilkeler yönünden değinilen denetim bütünü içinde önemli olan etkenlerden biri de insanın türlü tutum ve davranışlarıdır. Çünkü gerek yapı içi gerekse yapı dışı gürültülerin dolaylı ya da dolaysız olarak ortaya çıkmasında "insan" önemli rol oynar. İnsanlar belirli bir uygarlık düzeyine geldikleri ve toplumda birbirlerine saygılı bir biçimde yaşamayı öğrendikleri zaman kişilerin yalnızca kendi istek ya da çıkarları için başkalarını rahatsız eden gürültüler oluşmayacak, gereksiz ve yarasız olan gürültüler ortadan kalkacaktır. Bunun için:

- Toplumu (çok ufak yaşlardaki bireyler dahil) radyo, televizyon, basın ve

benzerleri gibi türlü iletişim yollarını kullanarak bilgilendirmek, uyarmak, eğitmek, türlü kurum ve kuruluşlarca, özellikle eğitim kurumlarında, konunun üzerinde önemle durmak,

- Bu konuda yayınlanmış olan yasa ve yönetmelik hükümlerinin sağlıklı bir biçimde uygulanmasını sağlamak önem taşımaktadır.

5.6 Sesin Geçmesi

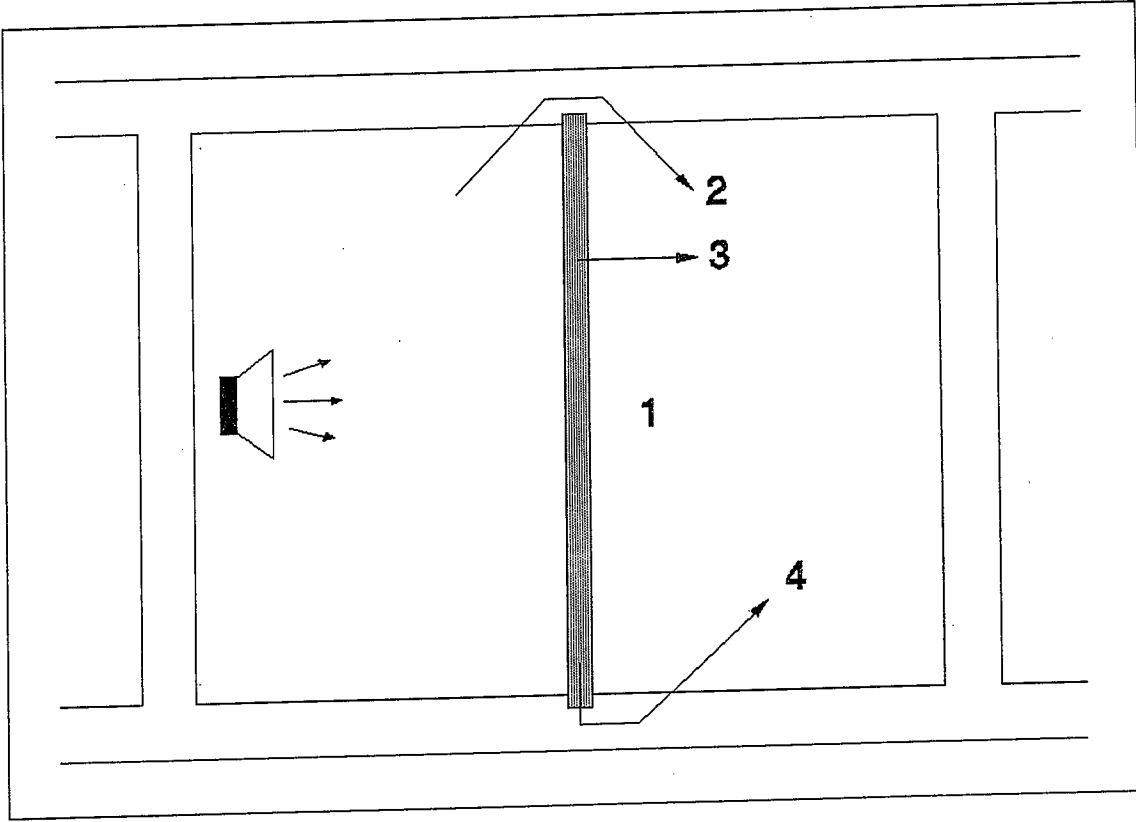
Yapılarda, gerek yapı dışı gürültülerin gerekse yapı içi gürültülerin, kullanıcıları etkilemesinde sesin geçmesi olayı önem taşır.

Yapı dışı gürültüleri yapıyı etkilemesinden yapı kabuğu aracılığı ile geçen ses sözkonusudur. Örneğin, trafik gürültüsünün yapılarda sorun yaratması gibi. Yapı içi gürültüleri de kimi zaman yapı kabuğu aracılığı ile çevreyi rahatsız eder. Örneğin, sanayi yapılarından kaynaklanan gürültüler gibi. Yapı içi gürültülerinin kullanıcıları etkilemesinde genelde bitişik hacimler ve katlararası bölme duvar ve döşemelerden sesin değişik yollarla geçmesi rol oynar.

Sesin geçmesi genellikle, ses enerjisinin bir ortamdan başka bir ortama geçmesi olayıdır. Bu geçiş, iki ortamı ayıran elemandan sesin geçirgenlikle, cidar titreşimiyle ve var ise açıklıklardan dolaysız olarak gerçekleşir. Ayrıca, sesin ara bölme dışında yan duvarlar aracılığıyla dolaylı geçişi de söz konusudur (Şekil 5.1).

5.6.1 Sesin Cidar Titreşimi İle Geçmesi

Yapılarda gürültü denetimi yönünden sesin cidar titreşimi ile geçmesi çok önemlidir.



Şekil 5.1 Sesin bir ortamdan başka bir ortama geçişi

Ses dalgaları duvar, döşeme, kap, cam vb. bir cidara geldiği zaman, bunu bütünüyle titreştirmeye zorlar. Titreşen bu cidarların arkasında bulunan havanın da titreşmesiyle ses geçer. Cidar kendini bütünüyle titreştirmeye zorlayan bu güce, bir başka deyişle, gelen ses dalgalarıyla hava basıncında beliren değişmelerin doğurduğu itme ve çekmelere, kitlesiyle karşı koyar. Bir cidar ne kadar ağır olursa, onu titreştirmek o oranda zor olur. Buna "kitle yasası" denir. Titreşen bir cidarla geçen sesteki azalma cidarın sesgeçirmezliğini (ses geçiş kaybını) gösterir. Sesgeçirmezlik frekansın artmasıyla artar, yani kitlelerin ince seslere karşı ses geçirmezlik değerleri yüksek olur. Yapılarda kullanılan her türlü gereç, öge ve bileşenlerin sesgeçirmezlik değerleri ölçülerek ya da hesaplanarak belirlenebilir. Ancak, ölçmelerin standartla uygun olarak yapılması, ampirik formüllerle yapılan hesaplamalarda ise, hesaplara katılmayan etkenlerin gözönünde tutulması gerekir. Çünkü, kimi nedenlerden ötürü ölçme ve

hesaplar arasında ayrımlar söz konusudur. Örneğin, cidarın özfrekanslarına rastlayan seslerle rezonansa girmesi sonucu, titreşmeye karşı kitlesiyle gösterdiği direncin büyük ölçüde azalması, dolayısıyla bu seslerin kolayca geçmesi, bir başkası, cidarın eğik gelen ses dalgalarıyla bir piston gibi ileri geri oynamayıp, dalgalanma yapması, ayrıca dalgalanma hareketi yapan cidarın gereşsel özellikleriyle ilgili belirli bir eğilme esnekliği nedeniyle cidarın öz dalgalanma frekanslarının bulunması ve eğik gelen sesin frekansları arasında bir uyma olması (frekans rastlaşması) sonucu belirli frekanslarda cidarın sesgeçirmezliğinin azalmasıdır.

5.6.2 Bileşik Cidar

Bir cidar, ses geçirmezlikleri değişik öğelerden (duvar + kapı, duvar + pencere, değişik kesitli bölme vb. gibi) yapılmış olabilir. Bu tür cidarlara bileşik cidar denir. Örneğin, yapı kabuğunun genellikle duvar + cam yüzeylerden oluşması gibi. Bir cidarın bileşik cidar olması durumunda cidarların sesgeçirmezlik değerleri arasında büyük ayırım varsa, sesgeçirmezlik değeri az olan cidar ufak ta olsa, cidarın bütününün sesgeçirmezliği büyük oranda azalır. Çünkü sesgeçirmezlik birimi (dB) logaritmasal bir büyüklük olduğu için bileşik cidarların toplam sesgeçirmezlikleri, değişik parçaların sesgeçirmezliklerinin toplamı gibi düşünülemez. Bileşik cidarın sesgeçirmezliği değişik yollarla hesaplanır. Eğer, sesgeçirmezliği fazla olan bir cidarda, sesgeçirmezliği az olan ufak bir alan varsa,

$$R = R_2 + 10 \log \left[\frac{S}{S_2} \right] \quad (5.1)$$

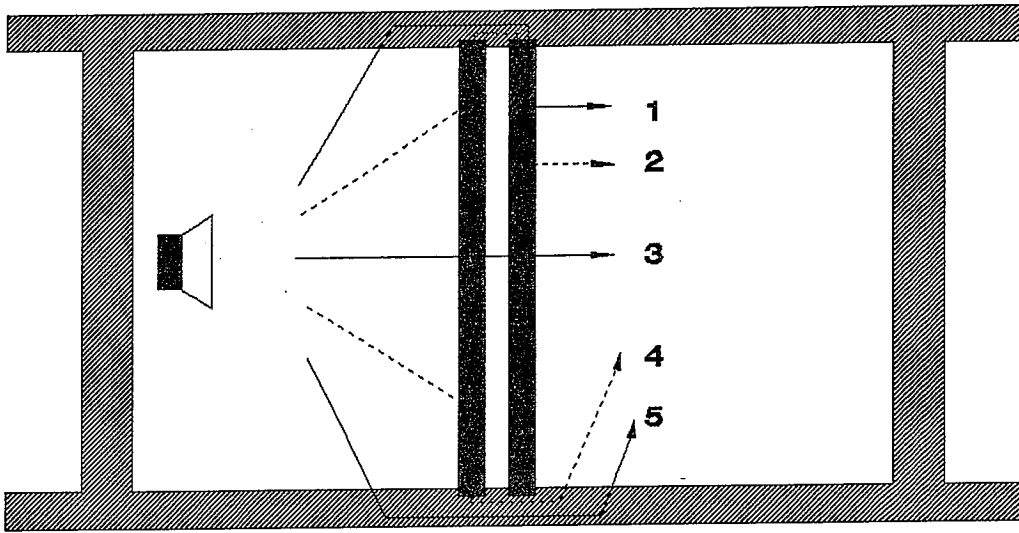
formülü ile bileşik cidarın sesgeçirmezliği bulunabilir.

Bu formülde

- | | | |
|-------|---|---|
| R | : | Bileşik cidarın sesgeçirmezliği (dB), |
| R_2 | : | Sesgeçirmezliği az olan ufak alanın sesgeçirmezliği (dB), |
| S | : | Bileşik cidarın toplam alanı (m^2), |
| S_2 | : | Sesgeçirmezliği az olan ufak cidarın alanı (m^2). |

Kütle ağırlığına bağlı olarak sesgeçirmezlik artmakla birlikte bu gürültü denetiminde çok etkili bir yol değildir. Örneğin, $R = 15.4 \log m + 10$ formülünde "m" on kat arttırıldığı zaman sesgeçirmezlik 15.4 dB artış göstermektedir. Günümüz yapılarında ağırlığı çok fazla olan kitlenin kullanılması pek uygun olmaz. Bunun yerine daha yüksek sesgeçirmezlik sağlayan çift cidar yapılması daha uygundur. Şekil 5.2'de çift cidarlı bir bölmede sesin alıcı hacme geçiş yolları gösterilmiştir.

Çift cidar yapımında özen gösterilmesi gereken kimi durumlar söz konusudur. Kuramsal olarak her ne kadar tek bir cidarı iki eşit parçaya ayırmak, eşit olmayan



Şekil 5.2 Sesin çift cidar bölmeli bir ortamdan başka bir ortama geçişi.

durumlarla ölçtürüldüğü zaman en yüksek ses geçirmezlik değerini sağlasa da rezonans ve frekans rastlaşması olayları nedeniyle bazı frekanslarda ses geçirmezlik değerleri düşer. Bu nedenle cidarlar arasında ayırım yapmak hatta iki cidar arasında oranların $(1/2, 1/3)$ gibi olmasından kaçınmak gerekir. Gereç olarak bu

sağlanamıyorsa bu durumda cidarlarda tesbit, ankastrelik farkı gibi ayırımlar yaratmak doğru olur. Çift cidar, mekanikteki kitle + yay + kitle sistemi gibi çalışır, cidarlar arasındaki hava ya da yalıtım gereçleri yay gibi iki kitleyi birbirine bağlar. Çift cidarlarda rezonans frekansının olabildiğince düşük değerlerde olması uygundur. Cidarların ağırlığının ve aradaki hava tabakasının kalınlığının artması bunu sağlar.

Çift cidar uygulamasında iki cidarı birbirine bağlayacak, bir başka deyişle, ses köprüsü oluşturacak detaylardan kaçınmak gerekir. Örneğin, iki cidarı aynı taşıyıcı sisteme katı olarak tesbit etmek, tesisat boruları, havalandırma kanalları geçirmek gibi. Bu tür uygulamalar çift cidarın ses geçirmezliğini azaltır. Eğer, tesisatla ilgili boru, kanal vb. elemanlar çift cidardan zorunlu olarak geçirilecekse o zaman titreşimleri sönümletici yalıtım yapılmalı ve açıklıklar kapatılmalıdır.

5.7 Yapı Dışı Gürültülerin Denetimi

Yapı dışı gürültülerine karşı yapılacak olan denetimde ilk ele alınacak etken dış gürültü ortamının belirlenmesidir. Çünkü yapıların bulundukları bölgelere ve işlevlerine göre, dış gürültüler kimi zaman önemsiz kalmakta, kimi zaman oldukça önemli sorunlar yaratmaktadır. Örneğin, gürültülü bir sanayi bölgesinde, gürültülü bir çalışma ortamı söz konusu ise, böyle bir yapıda dış gürültülere karşı çoğu kez özel önlemler gerekmez. Ama, aynı bölgede sessiz olması gereken bir yapı ya da hacim söz konusu ise o zaman dış gürültünün denetlenmesi gerekir.

5.7.1 Dış Gürültü Ortamının Belirlenmesi

Yapıların ön tasarım evresinde, yapılacağı bölgenin kentsel yerleşim planlarına göre gürültü ortamının ya da çevresinin bilinmesi önemlidir. Bunun belirlenmesinde

- Ölçme,
- Gözlem,
- Hesaplama

yöntemlerinden yararlanılması olanaklıdır.

Dış gürültüler yönünden trafik gürültüsü en yaygın ve etkili olanıdır. Özellikle karayolu araç trafiği, kent içinde en önemli gürültü kaynaklarını oluşturur. Bu nedenle dış gürültü denetiminde trafik gürültü ya da gürültülerin belirlenmesi, bunlara dayalı olarak gürültü haritalarının hazırlanması, yapıların dış gürültü denetiminde önemli veriler oluşturacağı için gerekli olan çalışmalardır.

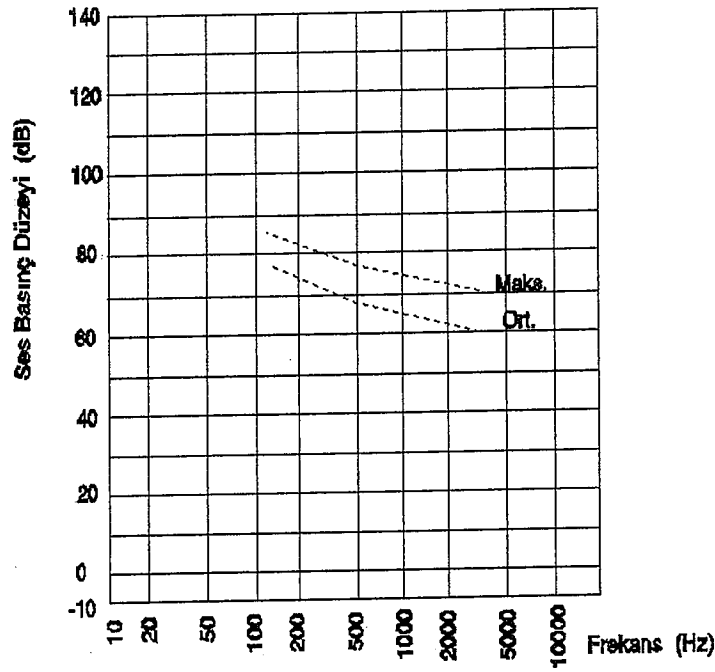
Belirleme çalışmalarında koşullara göre, yukarıda gösterilen yöntemlerden biri ya da birkaçı seçilebilir. Gürültü düzeyi ölçmeleri oldukça karmaşık olup, iyi nitelikli ölçme aygıtları ve titiz bir çalışma gerektirir. Gürültü denetiminin önemli olduğu yapılarda bu ölçmelerin konuyu yakından bilen uzmanlar tarafından ve yerinde yapılması doğru olur. Ölçmelerin sağlıklı olabilmesi için

- Ölçme aygıtları ve eklerinin doğru çalışması, kalibrasyonlarının yapılması,
 - Ölçümlerin Uluslararası Standartlara uygun olarak yapılması
- gereklidir. Gürültü denetiminin istenilen düzeyde sağlanabilmesi için ölçmelerde gürültü spektrumları çıkartılmalıdır.

Türlü nedenlerden ötürü yerinde ölçüm yapmak olanaksızsa, benzer koşulları içeren yapılmış ölçmelerden yararlanılabilir. Ancak, yaralanmada gözlemler ve bu konudaki deneyimler önemlidir. Bu nedenle bu tür yaklaşımların da uzmanlar tarafından yapılması gerekir. Örneğin, bir yolun trafik gürültüsünün belirlenmesinde eğer ölçme olanağı yoksa, bu konuda tanımlanmış ve ölçülmüş değerlerden yaralanma söz konusudur. Şekil 5.3'deki grafikte, belirlenen koşullar da ölçülen gürültü spektrumu

verilmiştir. Benzer koşullar olduğunda bu gürültü spektrumundan yararlanılabilir. Ayrıca, trafik gürültüleri, belirlenen tanımlara göre, türlü yöntem ve yaklaşımlarla elde edilen formüllerle hesaplanarak ya da oluşturulan grafiklerden veya bilgisayar programlarından yararlanarak ta bulunabilir.

Gürültü düzeylerinin belirlenmesinde, kaynak ya da kaynakların niteliklerine bağlı olarak yaklaşık hesap yöntemleriyle ortalama değerler bulunabilir. Bu tür çalışmalar gürültü denetimi ile ilgili ön tasarım çalışmalarında yararlanmak yönünden uygundur. Ancak, sağlıklı veriler, dolayısıyla sonuçlar, daha çok yerinde yapılan ölçmeler ile elde edilebilir. Örneğin, bir konut yerleşim bölgesinde sürekli kullanılan bir açık pazarın gürültü düzeyinin saptanmasında, hesaplama yerine yerinde ölçme yapmak daha olumlu bir yaklaşım olur.



Şekil 5.3 Saatte 2500-4000 taşıt geçen bir yolda, yol kenarında 3 m uzaklıkta ölçülen gürültü spektrumu

5.7.2 *Yapı Kabuğuna Gelen Gürültü Düzeyini Etkileyen Etkenlerin Değerlendirilmesi*

Gürültü kaynağı yapının çok yakınında bulunuyorsa, örneğin trafik yolundan 3-5 m uzakta yer alan yapılan gibi, yapı kabuğuna gelen gürültü düzeyi kaynağın gürültüsüne oldukça yakın olur, yani gürültünün yoğunluğu dış etkilere çok fazla etkilenmez.

Gürültü kaynağından belirli uzaklıkta bulunan yapılara gelen gürültü düzeyi ise, değişik etkenlerden ötürü çoğu kez azalır (bazı koşullarda ise gürültü düzeyinin artması da söz konusudur).

Yapı kabuğuna gelen gürültü düzeyini etkileyen bu dış etkenler

- Uzaklık
- Havanın moleküler yutuculuğu,
- Atmosfer ve iklim koşulları,
- Bitki ve zemin örtüsü,
- Topografik durum,
- Engeller

gibi sıralanabilir. Gürültü denetiminde, bu değişik türden olan etkenlerin hesaba katılması ve yapı kabuğuna gelen gürültü düzeyinin belirlenmesinde etkinlik durumlarına göre değerlendirilerek, gürültü spektrumu ile ilgili düzeltmeler yapılması gerekir. Fakat, yapı kabuğuna gelen gürültü düzeyini yerinde ölçme olanağı varsa, bu etkenlerin büyük bir bölümü hesaba katılmış demektir.

Dış etkenlerden özellikle uzaklık ve engeller (doğal ve yapay) gürültünün kaynaktan alıcıya gelirken çoğu koşullarda azalmasını sağlayan önemli etkenlerdendir. Bu

nedenle kent planlama yönünden yeni tasarlanan konut yerleşim bölgelerinde, bu etkenler gözönünde tutularak, sessiz olması gereken yapılarda yapı kabuğunun dış gürültülerden korunması doğru olur. Eski yerleşim bölgelerinden geçmesi zorunlu olan yeni trafik yollarının gürültüsünden yapıların korunmasında ise, özellikle engeller önemli rol oynar.

Eğer, yapı kabuğuna gelen gürültüyü yerinde ölçme olanağı yoksa, kaynağa belirli uzaklıkta ve koşullarda ölçülmüş olan gürültü düzeyi, yukarıda belirtilen etkenlerin hesaba katılmasıyla yeniden belirlenir. Dolayısıyla yapı kabuğuna gelen ve denetlenmesi gereken bu gürültü bu düzeltilmiş olur.

5.7.3 *Gürültü Denetiminde Kabul Edilebilecek Fon Gürültü Düzeylerinin Belirlenmesi*

Her hacmin kullanımına bağlı olarak yani, işlevinden ötürü oluşan, kabul edilebilir bir gürültü düzeyi vardır. Fon ya da geriplan gürültüsü olarak tanımlanan bu gürültü düzeylerinin belirlenmesi ve gürültü denetiminin ona göre yapılması gerekir. Eğer, gürültü denetiminde fon gürültü düzeyi gözönünde tutulmazsa, yapılan denetim ya yetersiz kalır ya da gereksiz yere değişik yönlerden giderlere neden olur. Örneğin, kabul edilebilecek düzeyin çok üzerinde gürültü denetimi yapılması fazladan işgücü, detaylandırma zorlukları getirdiği gibi, yapıda gereç, yer, para israfına da yol açar.

Değişik hacimlerde fon gürültü düzeyinin belirlenmesinde

- Kullağın zarar görmesinin önlenmesi,
- Konuşma ya da müzikte girişimlerin önlenmesi,
- Rahatsızlık sınırlarının değerlendirilmesi ve benzeri gibi amaçlarla yapılan

ve temeli öznel çalışmalara dayalı olan ölçütler (kriterler) oluşturulmuştur. Böyle

işlemler Bölüm 2'de bahsedilen NC ve NR eğrileri yardımıyla yapılmaktadır.

5.7.4 Yapı Kabuğunun Gerekli Ses Geçirmezliğinin Belirlenmesi

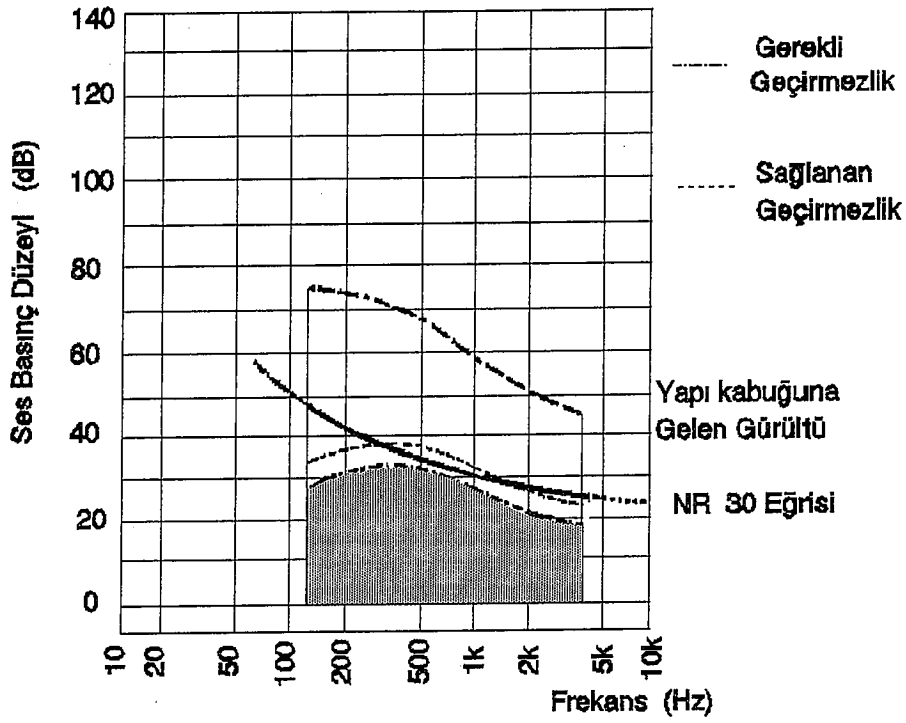
Yapı kabuğuna gelen gürültü düzeyinin bilinmesi ve yapı (hacim) içinde kabul edilebilecek fon gürültü düzeyinin belirlenmesi sonucu bu iki gürültü düzeyinin ayrimından yapı kabuğunun sağlaması gereken ses geçirmezlik değerleri bulunur. Bu durumda

$$R_g = G_d - NR \quad (5.2)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki formülde

R_g : Ses geçirmezlik,
 G_d : Düzeltilmiş gürültü,
 NR : Fon gürültüsü.

Örneğin, Şekil 5.4'de gösterildiği gibi, yapı kabuğuna gelen gürültü spektrumu biliniyorsa ve hacimde fon gürültü düzeyinin 30 olduğu varsayılırsa "0" dB'e göre hesaplanan bunların ayırımı (koyu olan alan) yapı kabuğunun gerekli ses geçirmezlik değerlerini frekanslara göre gösteren eğridir. Eğer, yapı kabuğuna gelen birden fazla gürültü söz konusu ise, bu durumda gürültü düzeyleri arasındaki ayrimlardan yapı kabuğuna gelen toplam gürültü düzeyleri hesaplanabilir. Örneğin, 70 ve 75 dB olarak iki ayrı gürültü varsa bunların toplamı 76 dB olur. (Bu ortalama bir değerdir, inceleme yapılan tüm frekanslarda toplam gürültü düzeylerinin hesaplanması gerekir).



Şekil 5.4 Yapı kabuğuna gelen gürültünün spektrumu

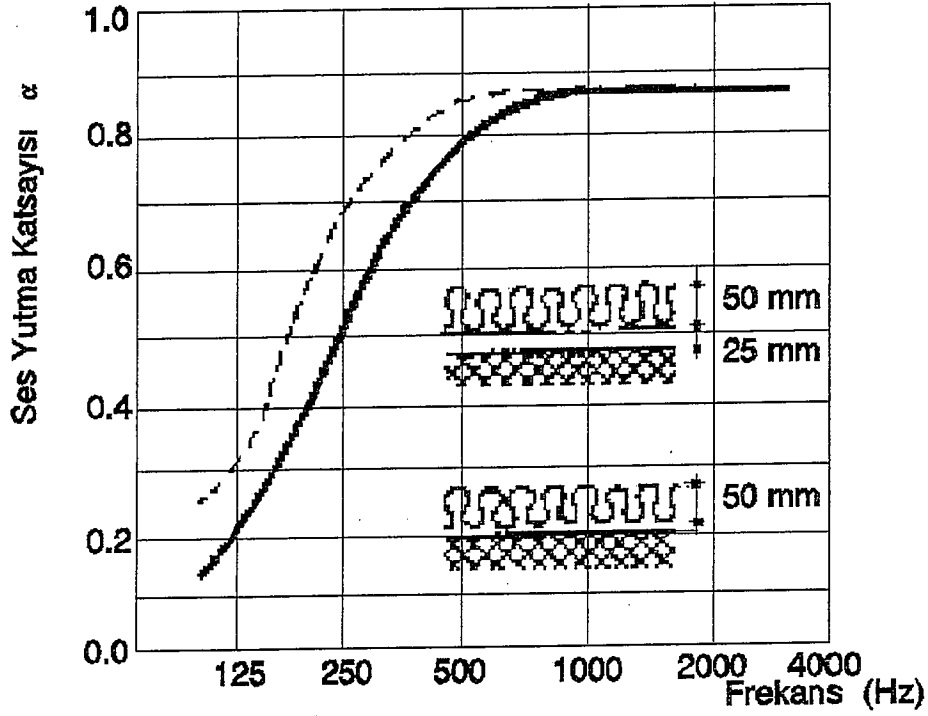
Uygulamalarda, gerekli ses geçirmezlik değerlerin 5 dB üzerinde ses geçirmezlik sağlanması olumlu sonuç verir. Çünkü, ses geçirmezlik hesaplarında hesaba katılması olanaksız olan, fakat ses geçirmezlik değerlerini etkileyen başka etmenler vardır.

5.7.5 Yapı Kabuğunun Ses Geçirmezliğinin Hesaplanması

Mimari tasarımda düşünülen ya da uygulanan yapı kabuğunun ses geçirmezliği

- Yapımda kullanılan gereçler-detaylar,
- Cam/dolu alanların oranları

yönünden önem taşır.



Şekil 5.5 Gözenekli malzemelerin çeşitli uygulamalardaki yutuculukları

Yapı kabuğunun ses geçirmezliğinde, özellikle sesin cidar titreşimi yolu ile geçmesi etkin yol olduğu için, yapımda kullanılan taş, tuğla, ahşap, metal gibi gereçler niteliklerine göre sesin az ya da çok geçmesi ile rol oynar. Ayrıca, tek cidar, çift cidar, sandviç sistemi gibi detaylarda ses geçirmezliği etkileyen önemli etkenlerdir.

Yapı kabuğunun

- Tamamen dolu,
- Tamamen cam,
- Belirli oranlarda dolu + cam

yüzeylerinden oluşması, ses geçirmezliği etkileyen bir başka etkindir. Tüm bu etkenler gözönünde tutularak yapı kabuğunun ses geçirmezlik değerleri genellikle formüller kullanılarak hesaplanabilir.

Çizelge 5.1'de, yapı kabuğunda dolu alan olarak kullanılan değişik gereçlerden oluşmuş duvarların kitle ağırlıklarına göre ortalama ses geçirmezlik değerleri, Çizelge 5.2'de ise aynı öğelerin değişik frekanslara göre ses geçirmezlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 Değişik gereçlerden oluşmuş duvarların kitle ağırlıklarına göre ortalama ses geçirmezlik değerleri

DOLU ALANLAR	YOĞUNLUK (kg/m ³)	SES GEÇİRMEZLİK R (dB)
Taş duvar, sıvasız 50 cm	2600	58.0
Betonarme perde duvarı, sıvasız 20 cm	2400	51.3
Dolu tuğla duvar, iki yanı sıvalı 24 cm	1800	50.6
Delikli tuğla duvar, iki yanı sıvalı 24 cm	1200	47.9
Gazbeton duvar, iki yanı sıvalı 25 cm	800	45.4

Yapı kabuğunda kullanılan cam yüzeyler (pencereler) - kitle ağırlıkları az olduğu için - sese karşı en zayıf öğelerdir. Cam kalınlığının artmasıyla, kitle ağırlığı artacağından ses geçirmezlik değeri de artar. Fakat kullanma detaylandırma, taşınma ve benzeri nedenlerden ötürü kalın camların kullanılması uygun değildir. Ayrıca, bilindiği gibi, ses geçirmezlik değeri (dB) logaritmasal bir büyüklük olduğu için, kitlenin artmasıyla ses geçirmezlik değerinde ki artış aynı oranda olmaz.

Çizelge 5.2 Değişik gereçlerden oluşmuş duvarların kitle ağırlıklarına göre ortalama ses geçirmezlik değerleri

DOLU ALANLAR	SES GEÇİRMEZLİK (dB)					
	FREKANS (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Taş duvar, sıvasız 50 cm	56.2	59.8	63.4	67.0	70.7	74.3
Betonarme perde duvarı, sıvasız 20 cm	48.4	52.0	55.6	59.3	62.9	66.5
Dolu tuğla duvar, iki yanı sıvalı 24 cm	47.6	51.2	54.8	58.4	62.1	65.7
Delikli tuğla duvar, iki yanı sıvalı 24 cm	44.4	48.1	51.7	55.3	58.9	62.5
Gazbeton duvar, iki yanı sıvalı 25 cm	41.6	45.2	48.8	52.4	56.0	59.6

5.8 İstenmeyen Akustik Olaylar İçin Ses Emici Malzemelerin Kullanımı

5.8.1 Sesin Emilmesi

Bir malzemenin ses yutuculuğunun etkinliği, ses yutuculuk katsayısı " α " ile ifade edilir. Bu ifade, malzemenin yuttuğu "gelen ses enerjisi" oranını belirtir. Teorik olarak 0'dan 10'a kadar değişebilir. Yapı malzemelerinin ses yutuculukları normalde 0.01 - 0.99 arası değişir. Yüksek ses yutuculuk katsayılarına sahip malzemeler (0.20'den daha

büyük), **ses yutucu malzeme** olarak adlandırılır. Düşük olanlar ise **ses yansıtıcı** özelliktedir. Verilen bir frekansta katsayılardaki fark etkisi aşağıda gösterilmiştir.

Katsayıdaki Değişim

0.05 - 0.10

0.10 - 0.20

0.20 ve yukarısı

Çoğu Durum İçin Etkisi

Küçük

Belirgin

Önemli

Bir malzemenin yutma katsayısı temel olarak çarpan ses dalgasının geliş açısına bağlıdır, ayrıca bir hacmin toplam yutuculuğu

(5.1)

$$a = \sum S \alpha$$

ile bulunabilir. Bu formülde

- a : Toplam hacim yutuculuğu,
 S : Yüzey alanı
 α : Verilen frekanstaki yutuculuk katsayısı.

5.8.2 Emiciliğe Tesir Eden Faktörler

Emiciliğe tesir eden faktörler şöyle sıralanabilir:

Frekans: Cisimlerin emicilik değerleri muhtelif frekanslara göre değişiklik gösterirler.

Kalınlık: Aynı malzemeden yapılmış muhtelif kalınlıktaki levhaların emicilik değerleri farklıdır. Kalınlık arttıkça emicilik artar.

Bağlayıcı madde: Malzemelerin çeşitleri ve ihtiva ettikleri bağlayıcı maddeler emicilik üzerinde rol oynar.

Sıkışıklık: Bilhassa lifli malzemelerin sıkışıklığı emicilik üzerinde etkilidir. Örneğin, 2 cm kalınlıktaki bir lifli malzeme gevşetilerek 4 cm'ye, veya sıkıştırılarak 1 cm kalınlığa

kadar getirilirse emicilik değerlerinde büyük farklar olur.

Sathın pürüzlüğü: Genel olarak sıvalar üzerinde tel fırça ile yapılan delik ve pürüzler ses emiciliğinde artırıcı rol oynar.

Uygulama yeri: Ses emici malzemelerin şerit veya parçalar halinde kullanılması takdirinde en yüksek emicilik salonun köşelerine yerleştirildiğinde olur.

Satıhdaki delikler: Akustik malzemelerin sathına, iğeriye doğru delikler açılması sadece emici satıhı bytmekle kalmayıp fazla olarak emicilik kabiliyetin artmasını temin eder.

Boya: Emici malzemelerin emicilik mekanizmasına göre boyanın değişik tesirleri vardır. Küçük delikli lifli malzemeler boyadan dolayı büyük miktarda emiciliklerinin bir kısmını kaybeder. Fırça ile sürülme yerine tabanca ile püskürtülen boya ses emiciliğine daha az zarar verir. Zira bu takdirde boya tabakaları daha ince olacağından delikler üzerinde kprlenmeğe meydan vermez.

Hiç bir şekilde yağlı boya kullanılmamalıdır. İzin verilebilecek tek tedavi uygulaması suda çözülmeyen mineral boyanın püskürtülmesidir.

5.8.3 Ses Yutucu Malzemelerin Sınıflandırılması

Ses yutucu malzemeler şu şekilde sınıflandırılabilir [13]:

- Gözenekli malzemeler,
- Panel ya da zar benzeri yutucular,
- Boşluklu ya da Helmholtz rezonatörleri,
- Mekan yutucuları,
- Değişken yutucular.

5.8.3.1 Gözenekli Malzemeler

Gözenekli tabakanın üretimi için çeşitli değişik lif tipleri uygundur. Bu lifler doğrudan doğruya yumuşak hasır örgü gibi kullanıldığı gibi, bağlayıcı bir malzemenin ilavesiyle paneller şeklinde sıkıştırılabilir.

Gözenekli tabakaların yutma karakteristikleri aşağıdaki önemli kurallarda sıralanmıştır:

- Gözenekli bir tabakadaki yutma frekans arttıkça artar.
- Düşük frekanslardaki yüksek yutma; düşük akış dirençli bir malzemeyi (gözenekli lifli malzemeler) ve aynı zamanda kalın bir tabakayı (10 cm ve yukarısı) gerekli kılar.
- Yüksek akış dirençli (örneğin sert lif levha paneller) yüksek derecede sıkıştırılmış malzemeler her zaman düşük yutmaya sahip olmuşlar, 1 cm'den kalın tabakaların hiç bir etkisi olmamıştır.

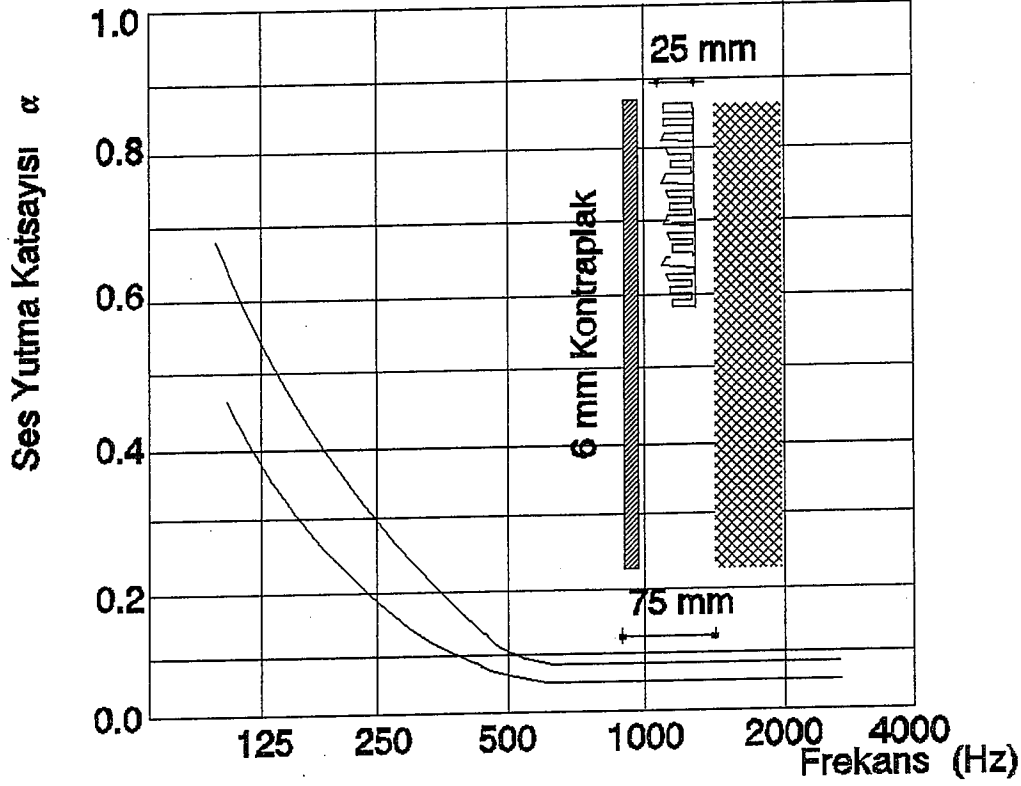
Gözenekli malzemeler 3 kategoriye ayrılır:

- Prefabrike akustik birimler,
- Akustik sıvalar ve spreyci malzemeler,
- Akustik (yalıtım) örtüleri.

5.8.3.2 Panel Yutucular

Deliksiz panel ya da zar benzeri yutucular, ses yutucu malzemelerin ikinci grubunu oluşturur. Bu, içinde lifli malzeme bulunan bir hava boşluğu üzerine katı bir zarın, örneğin kontraplak ya da sunta, kaplamasından oluşur. Şekil 5.6'de 6 mm'lik kontraplak bir panelin duvarlara uzaklığı 75 mm seçildiğinde, hava boşluğu içinde

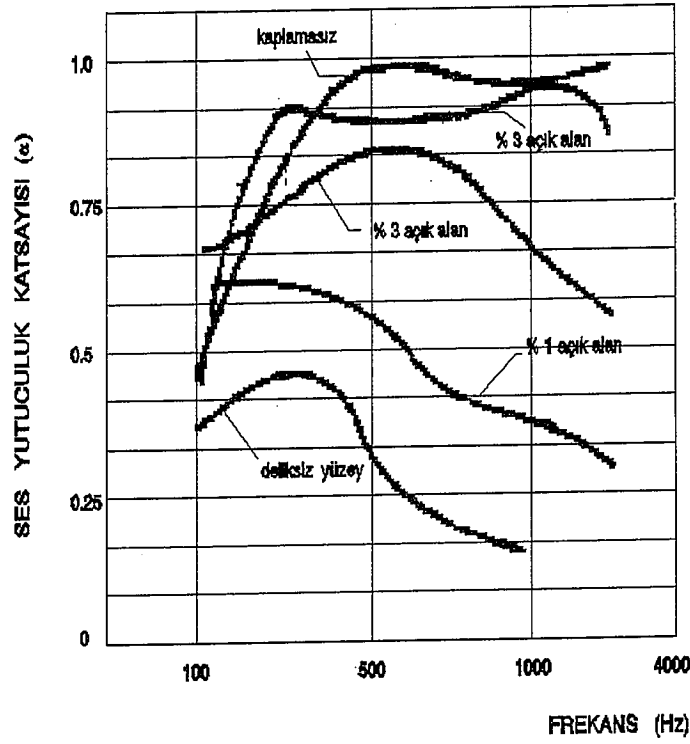
gözenekli malzemenin olduğu ve olmadığı durumlar için yutma frekans özellikleri gösterilir. Gözenekli yutucunun hava boşluğunda kullanılması düşük frekanslarda yutuculuğu artırmaktadır.



Şekil 5.6 Titreşen panelin yalıtımı ve yalıtımsız ses yutuculuk değerleri

5.8.3.3 Boşluk ya da Helmholtz Rezonatörleri

Bunlar ses yutucu malzemelerin üçüncü grubunu oluştururlar. Rijid duvarlar ile kapalı gövdeleri içinde hava boşluğu bulunduran ve dar bir açıklık ile (boyun adı verilen), çevresini saran boşluğa bağlanan ve bunun içinde ses dalgalarının ilerlediği ses yutucularıdır. Bir boşluk rezonatörü düşük frekans bandının bir dar bölgesi içindeki maksimum ses enerjisini yutar. Şekil 5.7'de hava boşluğu içinde yalıtım örtüsü bulunan delikli panel rezonatörlerin ses yutuculuğu verilmektedir.



Şekil 5.7 Hava boşluğu içinde yalıtım bulunan delikli panel rezonatörlerinin ses yutuculuk değerleri.

5.8.3.4 Mekan Yutucuları

Bunlar taş yünü, ya da cam lifi gibi genellikle 50 mm kalınlıkta 1 m² alanda bağımsızca hacim içine asılabilen levhalardır. Oditoryumun kendi iç hacim yüzeyleri; geleneksel akustik uygulamaları için uygun ve yeterli alana sahip değilse, ses yutucu nesneler ayrı birimler olarak tavana asılabilirler.

5.8.3.5 Değişken Yutucular

Aynı oditoryumun değişik kullanımları, farklı reverberasyon sürelerini gerektirir. Özellikle radyo stüdyolarında, gerektiğinde reverberasyon süresi ile belirgin farklılıkları

sağlayacak uygulamalar yapılabilir. Bunun için değişik, kayan, hareketli, mafsallı, döner paneller yapılarak gerektiğinde yansıtıcı gerektiğinde de yutucu yüzeyler oluşturulabilir.

5.8.4 *Ses Yutucu Malzemelerin Kullanım Yerleri*

Ses yutucu malzemelerin kullanım yerleri aşağıda verilmiştir:

Reverberasyon Kontrolü: Bir hacimdeki toplam ses yutuculuğunun her katlanışında reverberasyon süresi %50 azalır. Küçük hacimlerde, ses yutucu malzemele, hacim içindeki fazla yansımaları azaltır ve sesin direkt olarak kaynağından geldiği izlenimini verir.

Eko Kontrolü: Ses yutucu malzemeler (genellikle reverberasyon kontrolü ile birlikte) eko kontrolünde de kullanılırlar. Ekolar uzun gecikmiş ses yansımaları olup, hacmin genel reverberasyonunun üstünde net olarak duyulabilirler. "Tekrarlanan eko" adı verilen küçük hacimlerdeki eko sorunu ise ses yutucu malzemelerce kontrol edilebilirler.

Hacimlerdeki Gürültü Azaltımı: Doğru kullanıldığında, ses yutucu malzemeler, bir hacim içerisinde gürültü kontrolünde de etkin olabilirler. Ama sınırlı bir aplikasyonları olup, sanıldığı gibi aksine, tüm gürültü problemleri için bir çözüm kaynağı değildir. Örneğin, bir hacimdeki toplam ses yutuculuğunun her katlanışında gürültü yalnız 3 dB azaltılır.

6

TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ

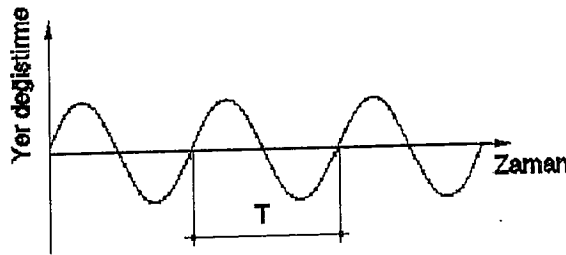
6	TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ	6.5
6.1	Giriş	6.5
6.2	Titreşimin Tanımı ve Genel Terimler	6.5
6.3	Piezoelektrik İvme Ölçerler	6.9
6.3.1	Titreşim Ölçümlerinde Kullanılan Dönüştürücüler	6.9
6.3.1.1	Yakınlık Probu	6.10
6.3.1.2	Kapasitif Prob	6.10
6.3.1.3	Konum Potansiyometresi	6.11
6.3.1.4	Piezorezistif Çevirici	6.11
6.3.1.5	Hareketli Bobin	6.11
6.3.2	İvme Ölçerin Çalışma Prensibi	6.11
6.3.2.1	İvme Ölçerin Analitik Davranışı	6.12
6.3.3	Frekans Bölgesi	6.17
6.3.3.1	Üst Frekans Limiti	6.18
6.3.3.2	Alt Frekans limiti	6.19
6.3.4	İvme Ölçerlerin Pratik Dizaynları	6.19
6.3.4.1	Delta Kayma Dizaynı	6.20
6.3.4.2	Düzlem Kayma	6.21
6.3.4.3	Merkez Monteli Sıkıştırma Dizaynı	6.21
6.3.4.4	Hat Sürücülü İvme Ölçerler	6.22
6.3.5	Piezoelektrik Malzemeler	6.23

6.3.6	İvme Ölçerlerin Hassasiyeti	6.25
6.3.6.1	Yük ve Voltaj Hassasiyeti	6.26
6.3.6.2	Birim Kazanç Hassasiyeti	6.27
6.3.6.3	Lineerlik ve Dinamik Bölge	6.28
6.3.6.4	Enine Hassasiyet	6.29
6.3.7	Pratikte İvme Ölçerlerin Performansı	6.32
6.3.7.1	Çevresel Etkiler	6.33
6.3.7.2	Sıcaklık Aralığı	6.33
6.3.7.3	Kısa Süren Sıcaklık Dalgalanması	6.35
6.3.7.4	Akustik Duyarlılık	6.37
6.3.7.5	Kaide Gerilmeleri	6.37
6.3.7.6	Nem Etkisi	6.38
6.3.7.7	Manyetik Duyarlılık	6.38
6.3.7.8	Radyasyon Etkisi	6.38
6.4	Titreşim Önyükselteçleri	6.38
6.4.1	Önyükselteç Dizaynı ve Çalışma Prensibi	6.39
6.4.2	Yük Önyükselteçleri	6.39
6.4.3	Voltaj Önyükselteçleri	6.40
6.5	Titreşim Ölçümleri	6.40
6.5.1	Titreşimle İlgili Standartlar	6.41
6.5.2	Titreşim Seviyesini Belirlemek İçin Parametre Seçimi	6.43
6.5.3	İvme Ölçer Monte Konumunun Seçilmesi	6.44

6.5.4	Titreşim Ölçüm Cihazları	6.46
6.5.4.1	Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu	6.47
6.5.5	Titreşim Frekans Analizi	6.49
6.5.5.1	Frekans Analiz Metodunun Seçimi	6.49
6.5.6	Titreşim Ölçümlerinin Kullanım Alanları	6.51

Günümüzde titreşim ve buna bağlı olarak gürültü, insan sağlığını ve cihazların kullanım sürelerini olumsuz yönde etkileyen önemli bir faktör olmuştur. Yüksek titreşim seviyesine maruz kalan bir kişinin sağlığında zaman içinde bazı bozulmalar görülecektir. Hava tabancası ile yol inşaatında çalışan bir kişide görülen Beyaz El (White Hand) rahatsızlığı buna bir örnek olarak verilebilir. Bu nedenle maruz kalınan titreşim seviyesinin çok iyi tespit edilip, analizinin yapılması ve mümkün olduğunca seviyesinin azaltılması gereklidir.

Peryodik titreşim, parçacığın veya cismin bir referans konum etrafında salınım hareketi olarak tanımlanabilir. Bu hareket, titreşim periyodu (T) olarak adlandırılan belirli zaman aralıklarında kendini tekrarlar. Peryodik titreşimin en basit örneği "Harmonik Hareket"tir. Harmonik hareketinin zamana göre değişim grafiği sinüsoidal bir eğri ile tanımlanabilir.



Şekil 6.1 Basit harmonik hareket

Titreşim frekansı,

(6.1)

$$f = \frac{1}{T}$$

bağıntısı ile ifade edilir.

Eğer titreşim tek bir eksen boyunca iletilen bir titreşim hareketi ise, cismin birbirini takip eden anlardaki referansa göre olan yer değiştirmesini belirten matematiksel ifade, aşağıdaki gibidir:

(6.2)

$$x = X_0 \sin \frac{2\pi t}{T} = X_0 \sin (\omega t)$$

Bu ifadede

$$\omega = 2\pi f$$

titreşimin açısal frekansı;

X_0 : Referans noktadan olan maksimum yerdeğiştirme (genlik);

t : Zaman.

Hareketli cismin hızı, yerdeğiştirmedeki değişimin zamana oranı olarak aşağıda gösterilen ifade ile tanımlanabilir.

(6.3)

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega X_0 \cos (\omega t) = v_0 \cos (\omega t)$$

Hareketin ivmesi, hızdaki değişimin zamana oranıdır ve hareketin ivme denklemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir

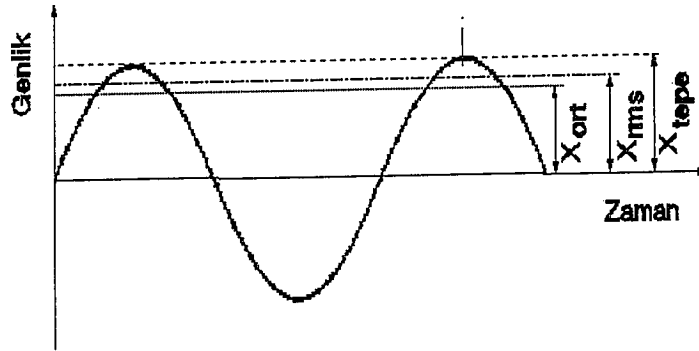
(6.4)

$$a = \frac{dv}{dt} = \omega^2 X_0 \sin (\omega t) = a_0 \sin (\omega t)$$

Yukarıdaki denklemlerden de anlaşıldığı gibi titreşimin yerdeğiştirmesi, hızı ve ivmesi hep değiştiği halde, formu ve periyodu hep aynı kalmaktadır. Bununla beraber hız,

yerdeğiştirmenin 90° faz açısı önünde ve ivme de hızın 90° faz açısı önündedir. Hareket basit harmonik hareket olduğu sürece tepe değerleri olarak tanımlanan büyüklükler çok daha kullanışlıdır. Çünkü bu değerler yukarıdaki ifadelerde olduğu gibi direkt olarak hareket denkleminde konulabilmektedir. Daha karmaşık hareketler incelendiğinde başka tanımlayıcı büyüklüklere ihtiyaç duyulur. Bunun nedenlerinden biri, tepe değerlerinin, titreşimin zaman incelenmesi olmadan sadece anlık titreşim değerleri olmasıdır. Zamana bağlı olarak tanımlanması gereken diğer büyüklükler aşağıda gösterilmiştir [14]:

Ortalama Mutlak Değer: şekil 6.2'de görüldüğü gibi tanımlanır. Tüm zaman değişimini göz önüne alır. Fakat ortalama değer ile fiziksel büyüklük arasında kullanışlı bir ifade yoktur.



şekil 6.2 Harmonik titreşim sinyali üzerinde tepe, etkin ve ortalama mutlak değerin gösterimi

$$X_{ORT} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (6.5)$$

Bu ifade, bir peryottaki zaman değişimini incelese de, pratik olarak bazı sınırlayıcılara sahiptir.

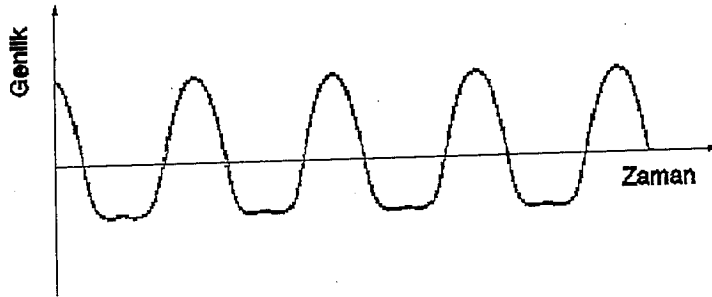
Etkin Değer (RMS): Titreşim seviyesini en iyi tanımlayan büyüklüktür.

$$X_{RMS} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T X^2 dt \right]^{1/2} \quad (6.6)$$

RMS değerinin açıklayıcı nicelik olarak öneminin asıl nedeni, titreşimin güç bileşeni ile ilgili olmasındadır. Basit harmonik hareket için belirtilen değerler arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$X_{RMS} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} X_{ORT} = \frac{1}{\sqrt{2}} X_0 \quad (6.7)$$

Günlük hayatımızda karşımıza çıkan bir çok titreşim periyodik olmalarına rağmen basit harmonik hareket değillerdir. Tipik harmonik olmayan hareket Şekil 6.3'de gösterilmektedir.

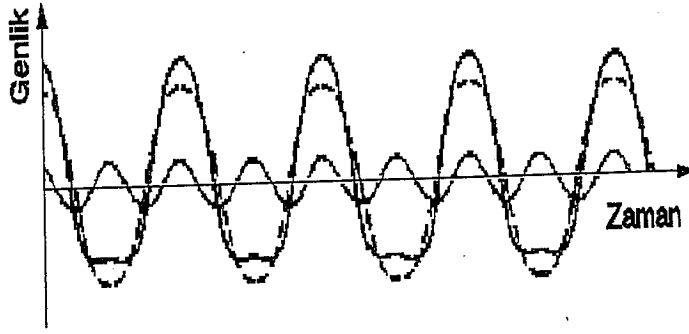


Şekil 6.3 Harmonik olmayan periyodik hareket

Titreşimin birbirine yapısal olarak bağlı elemanlar tarafından üretildiğini anlamak pratik olarak imkansızdır. Bu yüzden diğer tanımlama metodları kullanılmalıdır. En yararlı tanımlayıcı metodlardan biri, frekans analiz metodudur. Bu metod Fourier tarafından tanımlanmış matematiksel teoreme dayanır. Kompleksliği sorun teşkil etmeden, harmonik olarak birbirini takip eden birkaç sinüsoidal eğrinin bileşimi olan herhangi periyodik bir eğri de bu metodla incelenebilir.

$$f(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + X_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + X_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6.8)$$

İhtiyaç duyulan terimlerin sayısı sonsuz olabilir. Unutulmamalıdır ki, elemanların sayısı artırıldıkça orjinal eğriye çok daha yakın eğri elde edilir.



Şekil 6.4 Şekil 6.3'de verilen dalga şeklinin iki sinüsoidal dalgası ile ifadesi

6.3 Piezoelektrik İvme Ölçerler

6.3.1 Titreşim Ölçümlerinde Kullanılan Dönüştürücüler

Bu kısım piezoelektrik ivme ölçerlerin karakteristikleri ve çalışmaları hakkında temel ve sık sık teorik bilgi vermektir. Titreşim önyükselteçlerinin çalışmasının doğal yapısından dolayı performansları az bir ilave ile açıklanması gerekecektir. Fakat önyükselteçlerin karakteristiklerinin ve çalışmalarının açıklanması daha sonraki "Titreşim Önyükselteçleri" kısmında açıklanacaktır.

Piezoelektrik ivme ölçerler genel olarak, titreşimin mutlak ölçümü için var olan en iyi çeviriciler olarak kabul edilmişlerdir. Bu ise aşağıdaki özelliklerin direkt bir sonucudur:

- Çok geniş bir frekans bölgesinde kullanılabilir,

- Çok geniş bir dinamik bölgede mükemmel doğrusallık,
- İvme sinyali, hız ve yer değiştirme verisini sağlaması için elektronik olarak integre edilebilir,
- Titreşim ölçümleri, yüksek doğruluklu olarak çok geniş çevre şartları altında mümkündür,
- Öz-üretken (self-generating) olduğu için harici güç gerekmez,
- Hareketli parçalar olmadığından aşırı dayanıklıdır,

Yukarıda yazılı olan bu avantajların sağladığı yararları daha iyi anlayabilmek için diğer titreşim transdüserlerinin ve titreşim ölçüm cihazlarının karakteristiklerini incelemek faydalı olacaktır.

6.3.1.1 Yakınlık Probu

Sadece göreceli titreşim yerdeğiştirmelerini ölçen bir cihazdır. Statik yerdeğiştirmelere cevabı olup aynı zamanda düşük elektriksel empedansı vardır. Fakat cihaz öz-üretken değildir ve yüksek frekans performansı düşüktür. İlave olarak titreşen yüzey, elektriksel olarak iletken olmalıdır.

6.3.1.2 Kapasitif Prob

Küçük, temas etmeyen, yüksek hassasiyetli ve geniş frekans bölgesi titreşim

yerdeğiştirme çeviricileridir. Dezavantajları, titreşen yüzeyin elektriksel olarak iletken olması ve probun dinamik bölgesinin çok sınırlı olup, kalibrasyonun zor olmasıdır.

6.3.1.3 Konum Potansiyometresi

Statik yerdeğiştirmeleri ölçebilen düşük empedanslı, düşük fiyatlı bir cihazdır. Fakat dinamik ve frekans bölgesi kısıtlıdır. Cihaz sadece kısa kullanım ömürlü olup düşük çözünürlüğe sahiptir.

6.3.1.4 Piezorezistif Çevirici

Statik ivmelenmeyi ölçebilen bir titreşim çeviricidir. Ölçüm frekansı ve dinamik bölgesi geniş olabilir. Kısıtlı şok kapasitesi, bu tip çeviricilerin çabuk zarar görebileceğı anlamına gelir. Viskoz sönüm çeviricisi, şoklara karşı korumak için sık sık kullanılır. Fakat bu, çalışma sıcaklığının azalmasına yol açar ve faz karakterlerini değıştirir.

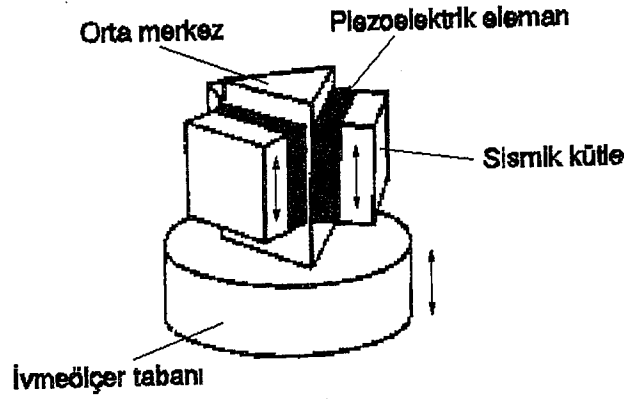
6.3.1.5 Hareketli Bobin

Düşük empedanslı öz-üretken titreşim hız çeviricidir. Frekans ve titreşim bölgesi kesin olarak sınırlanmıştır. Manyetik alanlara duyarlı olup manyetik alanın yönelimine bağılı olarak etkilenir.

6.3.2 *İvme Ölçerin Çalışma Prensipleri*

Şekil 6.6'da delta kayma tip piezoelektrik bir çeviricinin basitleştirilmiş bir modeli

görülmektedir [15].

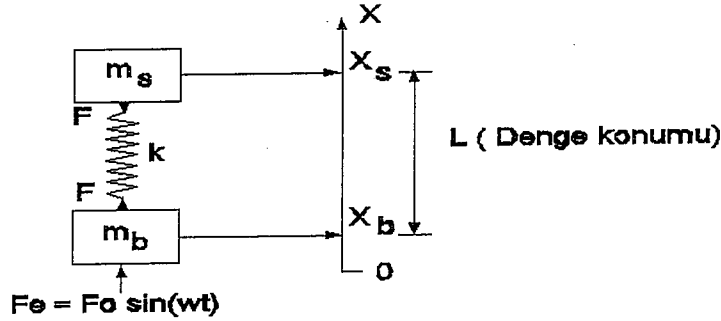


Şekil 6.5 Delta Kayma piezoelektrik ivme ölçerinin şematik gösterimi

İvme ölçerin aktif elemanları piezoelektrik elemanlardır. Bunlar ivme ölçerin kaidesini, katı üçgen bir parça ile sismik kütlelere bağlayan yaylar gibi davranır. İvme ölçer titreştirildiğinde sismik kütlenin ivmelenişi ve kütlesinin çarpımına eşit bir kuvvet, her bir piezoelektrik elemana etkir. Sismik kütleler sabittir, dolayısıyla elemanlar sismik kütlelerin ivmelenişi ile orantılı yük üretir. Sismik kütleler geniş bir frekans bölgesinde ivme ölçerin kaidesi ile aynı genlik ve fazda ivmelenirken, ivme ölçerin çıkışı kaidenin ivmelenişi ve dolayısıyla ivme ölçerin bağlandığı yüzeyin ivmelenişi ile orantılıdır.

6.3.2.1 İvme Ölçerin Analitik Davranışı

Şekil 6.6'de, yukarıda tanımlanan ivme ölçerin basitleştirilmiş bir modelini gösterilmektedir ve ataletli bir sisteme refere edilmiştir. İki kütle olup bir ideal yay ile bağlanmışlardır. Modelde sönüm ihmal edilmektedir. Çünkü bu tip ivme ölçerler çok küçük sönüm katsayısına sahiptirler.



Şekil 6.6 İvme ölçerin basitleştirilmiş modeli

- m_s : Toplam sismik kütle
- m_g : İvme ölçer kaidenin kütlesi
- X_s : Sismik kütlelerin yer değiştirmesi
- X_b : İvme ölçerin kaidesinin yer değiştirmesi
- L : Ataletli bir sistemde ivme ölçer dengede iken sismik kütle ve kaide arasındaki uzaklık
- k : Piezoelektrik elemanların eşdeğer yay sabiti
- F_e : Harmonik uyarıcı kuvvet
- F_o : Uyarıcı kuvvetin genliği
- ω : Uyarma frekansı $= 2\pi f$ (rad/s)
- ω_n : İvme ölçerin doğal frekansı (rad/s)
- ω_m : İvme ölçerin monte edilmiş rezonans frekansı (rad/s)
- f_m : İvme ölçerin monte edilmiş rezonans frekansı (Hz)
- f : Uyarma frekansı (Hz)

Böyle bir sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibidir

$$\mu \frac{d^2 r}{dt^2} = -k r - \left(\frac{\mu}{M_b} \right) F_o \sin \omega t \quad (6.9)$$

Burada

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{M_s} + \frac{1}{M_b} \quad (6.10)$$

veya

$$\mu = \frac{(M_s \times M_b)}{(M_s + M_b)} \quad (6.11)$$

μ " indirgenmiş kütle " olarak adlandırılır. r , sismik kütlelerin kaideye göre rölatif yerdeğiştirmesidir.

$$r = X_s - X_b - L \quad (6.12)$$

İvme ölçer serbest asılma konumunda ve dış kuvvetler ($F_e = 0$) ile uyarılmıyor ise ivme ölçerin hareket denklemi, serbest hareket için ;

$$\mu \frac{d^2 r}{dt^2} = - k r \quad (6.13)$$

ifadesine indirgenebilir. Bu basit diferansiyel denklem M_s 'in M_b ' ye göre rölatif yerdeğiştirmesini R genliğinde harmonik olarak değiştiğini varsayarak kolaylıkla çözülebilir. Diğer bir değişle;

$$r = R \sin \omega t \quad (6.14)$$

$$- \mu R \omega^2 \sin \omega t = - k R \sin \omega t \quad (6.15)$$

ve buradan ivme ölçerin rezonans frekansı ω_n doğrudan

$$\omega^2 = \frac{k}{\mu} \quad (6.16)$$

olarak yazılabilir. Bu bağıntıların sonucu yukarıdaki eşitliği aşağıdaki gibi yeniden

yazarak görülebilir.

$$\omega^2 = k \left(\frac{1}{M_s} + \frac{1}{M_b} \right) \quad (6.17)$$

Eğer ivme ölçer, toplam ağırlığından daha ağır bir yapı üzerine çok sıkı olarak monte edilirse M_b , M_s 'den büyük uzun olur. İvme ölçerin rezonans frekansı düşer. İvme ölçer sonsuz ağır yapı üzerine monte edilirse ($M_b \approx \infty$) son denklem;

$$\omega_m^2 = \frac{k}{M_s} \quad (6.18)$$

ifadesine indirgenir. Bu sismik kütle - yay sisteminin doğal frekansıdır ve ivme ölçerin monte edilmiş rezonans frekansı, ω_m , olarak tanımlanmıştır. Monte edilmiş rezonans frekansı, ivme ölçer sismik kütle - yay sisteminin bir özelliğidir. Bu frekansın, bir ivme ölçerin kullanılır çalışma frekans bölgesini tanımlamada kullanıldığı daha ileride görülecektir.

Pratikte, ivme ölçerin monte edilmiş rezonans frekansını ölçmek için ivme ölçeri sonsuz ağır ve sert yapı üzerine monte etmek mümkün değildir. Monte edilmiş rezonans frekansını ölçmek için ivme ölçer 180 gr lık bir çelik blok üzerine monte edilerek ,her ikisini geniş bir frekans bölgesi boyunca sabit bir ivmelenme ile uyararak bir yaklaşım yapılır. Bu daha ileride ki bölümlerde detaylı olarak ele alınacaktır.

Eğer yapı sonsuz rijid değil ise ya da ivme ölçer bağlantı tekniği, ivme ölçerin kaidesi ve yapısı arasında ek bir etkileşim oluşturuyorsa rezonans frekansı değişecektir. Rezonans ikiye ayrılacaktır ve en düşük rezonans frekansı monte edilmiş rezonans frekansından daha küçük olacaktır.

İvme ölçerin zorlanmış titreşimleri incelenmelidir. İvme ölçere etkiyen kuvvet daha önce tanımlanmış olan " ω_n " doğal rezonans frekansı ile birlikte analizde göz önünde bulundurulmalıdır. Model için hareket denklemi;

$$\ddot{r} + \omega_n^2 r + \left(\frac{F_o}{M_b}\right) \sin \omega t = 0 \quad (6.19)$$

şeklini alır. Yine kütlelerin yer değiştirmelerini sinüsoidal olarak ele aldığımızda;

$$R = - \frac{F_o}{M_b (\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (6.20)$$

olur. İvme ölçerin doğal rezonans frekansının çok altındaki frekanslarda ($\omega \ll \omega_n$) R_o olarak adlandırılan yer değiştirme aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_o = - \frac{F_o}{M_b \omega_n^2} \quad (6.21)$$

Düşük frekansdaki yer değiştirme R_o 'ın, yüksek frekansdaki yer değiştirme R 'ye oranı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{R}{R_o} = - \frac{\frac{F_o}{M_b (\omega_n^2 - \omega^2)}}{- \frac{F_o}{M_b \omega_n^2}} \quad (6.22)$$

Bu oranı A ile gösterip ifadeyi yeniden düzenlersek:

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (6.23)$$

ifadesi elde edilir. Bu önemli sonuç; uyarıcı frekans, ivme ölçerin doğal rezonans frekansı ile karşılaştırılacak hale geldiğinde, sismik kütleler ve kaide arasındaki yer değiştirmenin çok arttığını gösterir.

İvme ölçerin serbest asma doğal rezonans frekansı, toplam sismik kütlelerin çevircinin geride kalan kütlesine, fakat öncelikli olarak kaidesinin kütlesine oranına

bağlıdır. Genel bir kural olarak ivme ölçerin toplam sismik kütlesi, yaklaşık olarak kaidenin kütlesi ile aynıdır ve aşağıdaki ilişki ile verilir.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx \frac{\text{Monte edilmiş rezonans frekansı}}{\text{serbest asma rezonans frekansı}} \quad (2.24)$$

6.3.3 Frekans Bölgesi

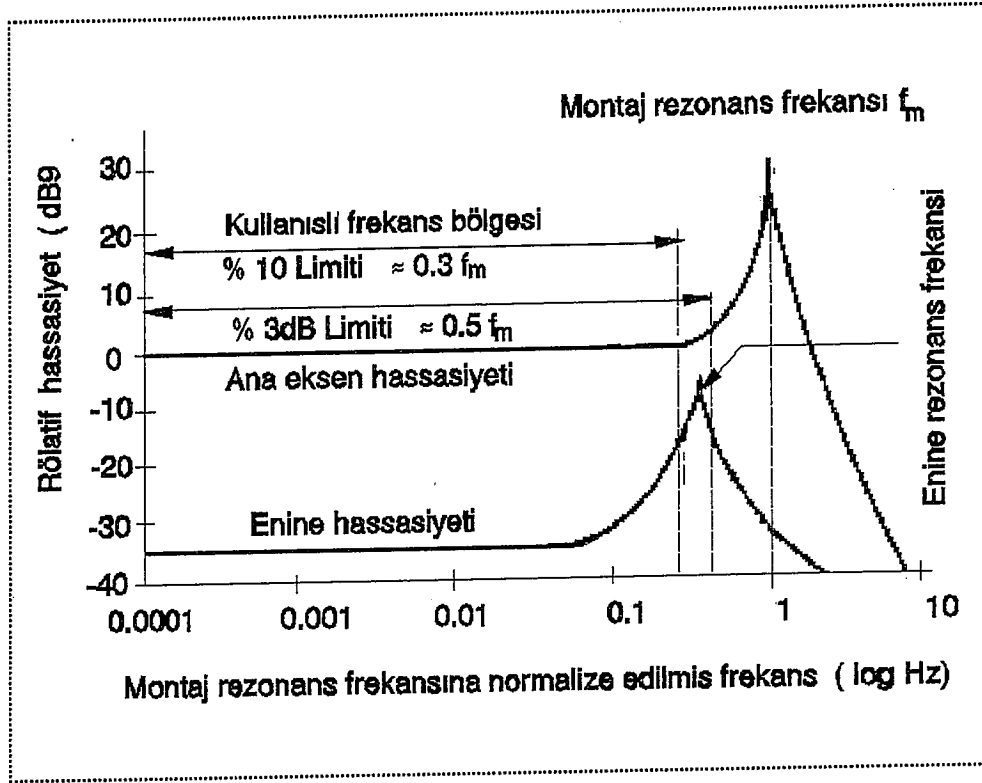
İvme ölçerin frekans cevap eğrisinden bir kaç kullanışlı frekans bölgesi tanımlanabilir.

- **% 5 Frekans limiti** : İvme ölçerin kaidesine uygulanan titreşim düzeyinin gerçek ve ölçülen değeri arasında % 5 lik sapmanın olduğu frekansıdır. Bu doğrulukla ölçülebilen maksimum titreşim frekansı, yaklaşık olarak monte edilmiş rezonans frekansının 1/5' i (0.22) kadardır.

- **% 10 Frekans limiti** : İvme ölçerin kaidesine uygulanan titreşim düzeyinin gerçek ve ölçülen değeri arasında % 10' luk sapmanın olduğu frekansıdır. Bu doğrulukla ölçülebilen maksimum titreşim frekansı yaklaşık olarak monte edilmiş rezonans frekansının 1/3' ü (0.30) kadardır.

- **3 dB Frekans limiti** : İvme ölçerin kaidesine uygulanan titreşim düzeyinin gerçek ve ölçülen değeri arasında 3 dB'lik farkın olduğu frekanstır. Bu doğrulukla ölçülebilen maksimum titreşim frekansı yaklaşık olarak monte edilmiş rezonans frekansının yarısı (0.54) kadardır.

Şekil 6.7'deki frekans cevap eğrisi, ivme ölçer geniş bir frekans bölgesinde sabit bir titreşim düzeyi ile uyarıldığında, ivme ölçerin elektriksel çıkışındaki değişimi gösterir. Böyle bir referans cevap eğrisini elde etmek için ivme ölçer 180 gr lık uyarıcı kafasına monte edilir. Böylelikle ivme ölçerin monte edilmiş rezonans frekansı bulunabilir. Bu



Şekil 6.7 İvmeölçerin frekansa bağlı olarak rölatif duyarlılığı

frekans cevap eğrisi, daha önce belirtilen (6.23) denklemi ile ilgilidir. Fakat şimdi monte edilmiş rezonans frekansı;

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2} \quad (2.25)$$

ifadesini elde etmek için, doğrudan (6.23) denkleminin yerine kullanılabilir. Bu denklem herhangi bir frekansdaki gerçek ve ölçülen titreşim arasındaki sapmayı ve kullanışlı frekans bölgesini tanımlamada kullanılabilir.

6.3.3.1 Üst Frekans Limiti

Şekil 6.7'de görülen monte edilmiş rezonans frekansı, ivme ölçerin sabit titreşim

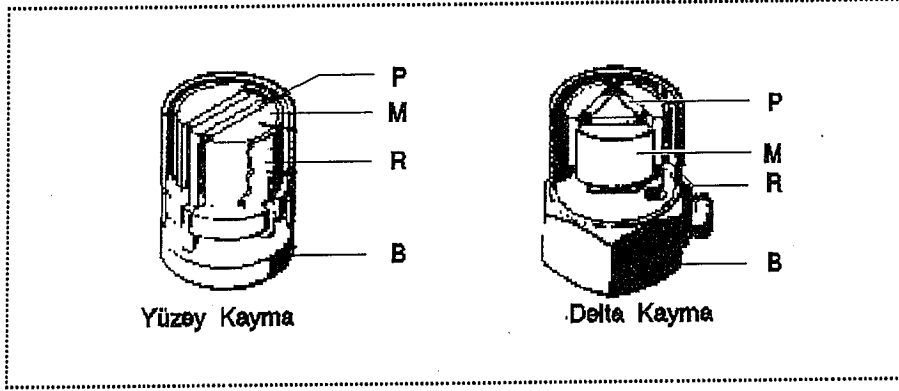
giriş için sabit elektriksel çıkışı sağlanırken kullanılabilirdiği frekans bölgesini belirler. Monte edilmiş rezonans frekansı artıkça kullanılan frekans bölgesi genişler. Monte edilmiş yüksek rezonans frekansı elde etmek için ya rijid elemanlar ya da düşük toplam sismik kütleye sahip olmak gerekmektedir. Piezoelektrik elemanların esnekliği genelde sabit olduğundan gerekli olan şey düşük sismik kütledir. Fakat böyle küçük kütleler piezoelektrik elemana az kuvvet etkimesine sebep olur ve sonuç olarak ivme ölçer daha az duyarlılık gösterir. Bu nedenle yüksek frekans performansına sahip olan ivme ölçerler az hassasiyetlidir. Fakat bunun tersine yüksek duyarlılıklı ivme ölçerler çok yüksek ölçme kapasitesine sahip değillerdir.

6.3.3.2 Alt Frekans Limiti

Piezoelektrik ivme ölçerler gerçek DC cevabı vermeye muktedir değillerdir. Piezoelektrik elemanlar üzerine dinamik kuvvetler etkiğinde sadece yük üretirler. Gerçek alt frekans limitini, ivme ölçerin bağlandığı önyükselteçler belirler. Çünkü bu önyükselteçler ivme ölçerden akan yük oranını belirlerler. 0.003 Hz kadar olan frekanslardaki titreşim ölçümleri ivme ölçer ve ilgili önyükselteçleri ile mümkündür. Hertz'in kesirleri mertebesindeki düşük frekans gerektiren uygulamalar çok nadirdir.

6.3.4 *İvme Ölçerlerin Pratik Dizaynları*

İvme ölçerlerinin dizaynında 3 farklı mekanik konstrüksiyon kullanılmaktadır. İlk iki dizayn olan düzlem kayma ve delta kayma Şekil 6.8'de görülmektedir. Sıkıştırma dizayn (Şekil 6.9) da kullanılmaktadır. Delta kayma dizaynı, üstün performansından dolayı hemen hemen birçok ivme ölçerde kullanılmaktadır.



Şekil 6.8 Düzlem Kayma ve Delta Kayma dizaynları.

M	:	Sismik kütle
P	:	piezoelektrik element
R	:	Sıkıştırma halkası
B	:	Kaide

6.3.4.1 Delta Kayma Dizaynı

3 piezoelektrik ve 3 kütle üçgen merkezi bir yer etrafında konfigirasyon oluşturacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Bu elemanlar yüksek gerilme sıkıştırma halkası kullanarak bir arada tutulurlar. Sistemi bir arada tutmak için yapıştırıcı veya civata gerekmektedir ve bu optimum performans güvenilirliği sağlamaktadır. Halka, yüksek dereceli lineerlik vermesi için piezoelektrik elemanları sıkıştırır. Yük, sıkıştırıcı halka ve yuva arasında birikir.

Delta kayma dizayn, diğer dizaynlarla karşılaştırıldığında yüksek hassasiyet - kütle oranı verir. Yüksek rezonans frekansı ve kaide gerilmeleri ve sıcaklık geçişlerinden yüksek izolasyona sahiptir. Bu dizaynın mükemmel karakteristikleri, genel amaçlı ivme ölçer ve çok özel tipler için delta kayma dizaynı ideal yapar.

6.3.4.2 Düzlem Kayma

Bu dizaynda, delta kayma dizaynında olduğu gibi piezoelektrik eleman, kayma deformasyonuna maruz kalır. 2 dilim dikdörtgen piezoelektrik malzeme, dikdörtgensel bir merkezi yerin her iki tarafında olacak şekilde düzenlenmiştir.

İki kütle Şekil 6.8'de görüldüğü gibi oluşturulmuş ve delta kayma dizaynındaki aynı fonksiyonu yapan yüksek gerilme sıkıştırma halkası kullanılarak birarada tutulmuştur. Kaide ve piezoelektrik elemanlar, kaide eğilmelerine ve sıcaklık dalgalanmalarına mükemmel direnç gösterecek şekilde etkin olarak izole edilmişlerdir.

6.3.4.3 Merkez Monteli Sıkıştırma Dizaynı

Bu geleneksel, basit konstrüksiyon kabul edilebilir hassasiyet - kütle oranı verir. Piezoelektrik eleman kütlelerin yay sistemi ivme ölçerin kaidesine tutulmuş olan silindirle, bir merkezi yere monte edilir. Fakat kaide ve merkezi yer piezoelektrik elemanlarla paralel olarak yay gibi davrandığından ve kaidedeki eğilme veya sıcaklık genişmeleri gibi herhangi bir dinamik değişimler piezoelektrik elemanlar içinde gerilmelere dolayısıyla hatalı çalışmalara sebep olabilir. Hatta sıkıştırma dizaynlarda bu etkileri minimize etmek için çok kalın kaideler sağlamasına rağmen eğilme ve gerilme kuvvetleri hala piezoelektrik elemanlara iletilebilir. Bu ise titreşimin frekansında titreşimle ilgili olmayan hatalı çıkışlara neden olur.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı hatalı çıkışın titreşim sinyali ile kıyaslandığında küçük olduğu yüksek seviye ölçümleri diğer bir deyişle şok ölçümleri için genelde sadece sıkıştırma dizaynı ivmeölçer üretilir. Aynı zamanda sıkıştırma dizayn ivmeölçer kalibrasyonu kontrolü şartlarında kullanılan referans ivme ölçer

dizaynında da kullanılır. Burada berilyum diskin ilavesi kaide gerilme etkisini minimize



Şekil 6.9 Geleneksel sıkıştırma dizaynı

M = sismik kütle

P = piezoelektrik eleman

B = kaide

S = yay

eder ve kaideyi kuvvetlendirir. Bu ivmeölçer, monte edildiği kaidedeki titreşimi daha doğru ölçmek için ters monte edilir.

6.3.4.4 Hat Sürücülü İvme Ölçerler

Bu ivmeölçerlerin içinde bir önyükselteç bulunur. Bu dizaynın ivmeölçer bölümü yukarıda bahsedilen delta kayma konstrüksiyon ile aynıdır. Elektronik bölüm mükemmel performans karakteristikli bir ön yükselteç üretmek için ince film mikro devre tekniklerini kullanır.

Hat sürücü ivmeölçerler çalışabilmeleri için harici bir güce ihtiyaç duyarlar. Sabit bir voltaj önyükseltece uygulanır ve titreşim sinyali, modüle edilmiş güç kaynak akımı

şeklinde haricen kaynağa geri gönderilir. Bu ön yükselteçler sıcaklık ve şok kısıtlamaları ile karşılaşır. Bunu yenmek için ivme ölçerlerle birlikte kullanılması için ayrıca hat sürücü ön yükselteçler kullanılır.

6.3.5 Piezoelektrik Malzemeler

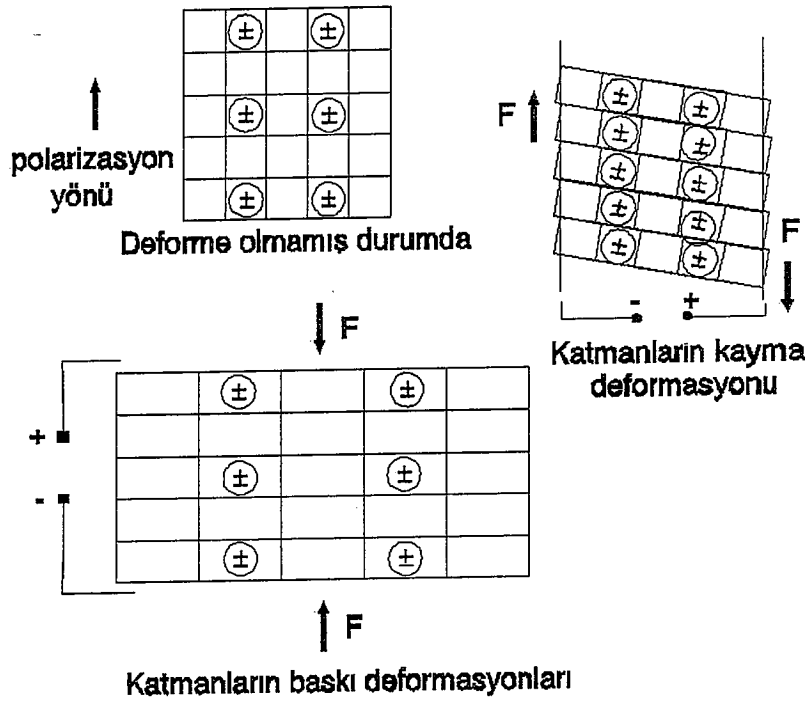
Piezoelektrik malzeme kuvvete maruz kaldığında elektriksel yük üreten bir malzemedir. Bu özelliği gösteren malzemeler Kuartz ve Rochell tuzu gibi piezoelektrik tek kristaller ve çeşitli bileşiklerin karışımı olan baryum titanat, kurşun tirkonat gibi yapay olarak polarize edilmiş ferroelektrik seramiklerdir.

Seramiklerin polarize edilmesi prosesi, bir parça yumuşak demirin bir manyetik alanla manyetize edilebildiği prosesle benzerdir. Yüksek voltaj malzemenin iki ucu boyunca uygulanır. Malzemenin moleküler yapısı içindeki katmanlardaki yük dağılımı, bir dış kuvvet uygulandığı zaman deformasyona uğrayacak ve zıt polariteli yükler, malzemenin zıt uçlarında oluşacak şekilde işlem yapılır. Şekil 6.10, bu etkinin basitleştirilmiş bir şeklini göstermektedir.

Piezoelektrik bir ivmeölçer titreştirildiğinde uygulanan ivmelenmeyle orantılı kuvvetler piezoelektrik elemanlar üzerine etkin ve onlar tarafından üretilen yük kontak aracılığı ile alınır. Bu ise, çok geniş dinamik ve frekans bölgesinde üretilen yük ile uygulanan kuvvet arasındaki aşırı lineer ilişkiyi göstermektedir. Ayrıca bu piezoelektrik ivmeölçerin mükemmel karakteristiklerinden biridir. Piezoelektrik malzemenin kuvvet hassasiyeti pC/N olarak verilir.

q yükü, belirtilen yüzeyler arasında toplanır. Piezoelektrik eleman, şekil 6.10'da görüldüğü gibi sıkıştırma ve kayma deformasyonlarının her ikisine de dayanabilir. Her iki durumda da kuvvetlerin uygulandığı yüzeyler boyunca yük oluşur.

Sıkıştırma deformasyonda, yük polarizasyon doğrultusunda alınır. Sıcaklık dalgalanmaları gibi titreşim olmayan girişlerde yükün polarize edilme yönünde toplanmasına neden olması bir dezavantajdır. Bu yük, aynı zamanda titreşimde oluşturulan yük tarafında da toplanır. ve artık ivmeölçerin çıkışı sadece titreşim girişi ile ilgili değildir. Bu, kayma tipi ivmeölçerlerin sıkıştırma dizaynından daha iyi performans vermesinin nedenlerinden biridir.



Şekil 6.10 Yapay olarak polarize edilmiş seramik içerisinde piezoelektrik etkinin basit modeli.

Ferroelektrik seramikler, ihtiyaç duyulan herhangi bir şekilde üretilebilir, farklı uygulamalar ve farklı özellikler vermek için değiştirilebilirler. Bu işlem, Kuartz gibi piezoelektrik tek kristal malzemelerde, kompozisyonları sabit ve şekilleri kesildikleri kristalin ölçüleri tarafından sınırlandırıldığı için mümkün değildir. Bu nedenle tek kristal

eleman kullanan ivmeölçerler, ferroelektrik seramik eleman kullanan ivmeölçerlerden daha az hassasiyete ve iç kapasiteye sahiptir. Genel olarak endüstride kullanılan ivmeölçerlerdeki piezoelektrik malzemeler PZ 23, PZ 27, PZ 45 ve PZ 100 olarak adlandırılırlar. Bunlar aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- **PZ 23** : Ferroelektrik seramiklerin kurşun zirkonat ailesinden kurşun titanat'a aittir ve yapay olarak polarize edilmiştir. 250 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir. yüksek hassasiyete (yaklaşık 300 pC/N) ve diğer tüm iyi özelliklerinden dolayı birçok ivmeölçerde kullanılmaktadır.

- **PZ 27** : PZ 23'e çok benzeyen yapay olarak polarize edilmiş kurşun zirkonat titanat'tır. Bu, minik ivmeölçerlerde kullanım için uygundur.

- **PZ 45** : 400 °C'ye kadar kullanılabilen, özellikle düzgün sıcaklık cevabına sahip olan yapay olarak polarize edilmiş, özel olarak formüle edilmiş olan ferroelektrik seramiktir. Bu malzeme yüksek sıcaklık ve yüksek şok ivme ölçerlerinde kullanılmaktadır.

- **PZ 100** : Dikkatlice seçilmiş ve hazırlanmış bir Kuartz kristalidir. Düşük sıcaklık iletim hassasiyetine, mükemmel stabiliteye sahip olup 250 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir. Standart referans ivmeölçerlerde ve kuvvet trasdüserlerinde kullanılmaktadır.

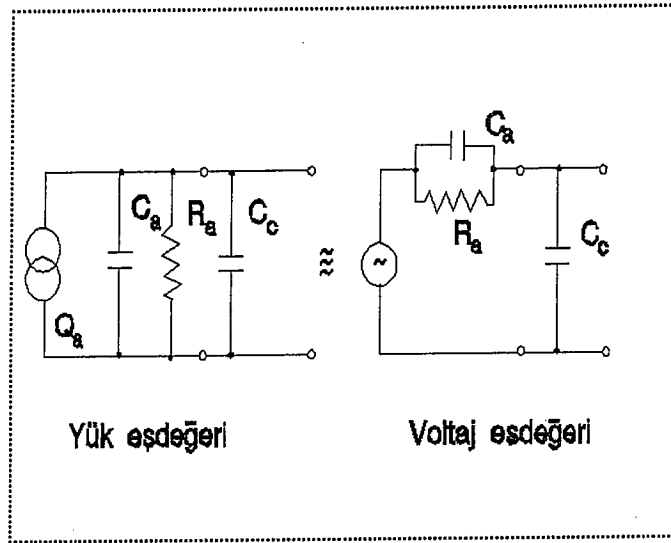
6.3.6 *İvme Ölçerlerin Hassasiyeti*

Buraya kadar ivmeölçerlerin, elektriksel çıkışının uygulanan ivme ile orantılı olan öz-üretken bir cihaz olduğu görülmüştür. İvme ölçerin rolünün bir ölçüm cihazı olduğunu belirlemek için girişi, ivmelenme ve çıkışı, yük veya voltaj, arasındaki ilişki şimdi daha

fazla detaylı incelenecektir.

6.3.6.1 Yük ve Voltaj Hassasiyeti

Piezoelektrik ivmeölçer ya bir yük kaynağı veya bir voltaj kaynağı olarak ele alınabilir. Piezoelektrik eleman pratik nedenlerden dolayı ihmal edilebilen çok yüksek iç kaçak direnci, R_a ile paralel olan bir kondansatör, C_a gibi davranır. İvmeölçer şekil 6.11'de görüldüğü gibi ya C_a ve kablo kapasitansı, C_c ile paralel ideal bir yük kaynağı gibi yada C_c tarafından yüklenmiş ve C_a ile seri bir voltaj kaynağı gibi davranır. Her iki modelin eşdeğer devreleri şekil 3.8'de görülmektedir. Her iki model de, hesaplama kolaylığı gözönünde bulundurularak bağımsız olarak kullanılabilir.



Şekil 6.11 Piezoelektrik ivmeölçerler ve bağlantı kabloları için eşdeğer elektrik devreleri.

İvmeölçer önyükseltecinin seçimi; bizim, ivmeölçerin elektriksel çıkışından voltaj ya da yük algılama isteğimize bağlıdır. Piezoelektrik ivmeölçerin yük hassasiyeti S_{qa} , ivmelenme başına yük "pC" olarak kalibre edilir. Benzer şekilde voltaj hassasiyeti ivmelenme başına voltaj olarak ifade edilir. Piezoelektrik ivme ölçer ya bir yük kaynağı

veya bir voltaj kaynağı olarak ele alınabilir. Piezoelektrik ivmeölçerin yük hassasiyeti S_{qa} , ivmelenme birimi basınç yükü "pC" olarak kalibre edilir.

$$S_{qa} = \frac{pC}{m \ s^{-2}} \quad (6.26)$$

$$S_{va} = \frac{mV}{m \ s^{-2}} \quad (6.27)$$

İvme ölçerin kullanışlı çalışma frekans bölgesindeki düşük ve orta frekanslardaki voltaj hassasiyeti frekanstan bağımsızdır. Bu olay PZ 45 ve PZ 100 piezoelektrik malzeme kullanan ivme ölçerlerin yük hassasiyeti ile aynıdır. Fakat PZ 23 ve PZ 27 piezoelektrik malzeme kullanan ivme ölçerler için geçerli değildir. Aslında bu piezoelektrik malzeme frekans artarken yük hassasiyeti ve kapasitans her dekad başına yaklaşık olarak % 2.5 olacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu azalmanın etkisi rezonanstaki çıkış artışını kısmen kaydırmaktadır. Bu nedenle orta ve yüksek frekanslı PZ 23 kullanan ivme ölçerlerin kullanışlı çalışma frekans bölgesi üstündeki gerçek ve ölçülen ivmelenmeler arasındaki maksimum sapma Şekil 2.9'da görüldüğü gibi ivme ölçerin kaidesine uygulanan ivmenin sadece $\pm$ % 5'i dir.

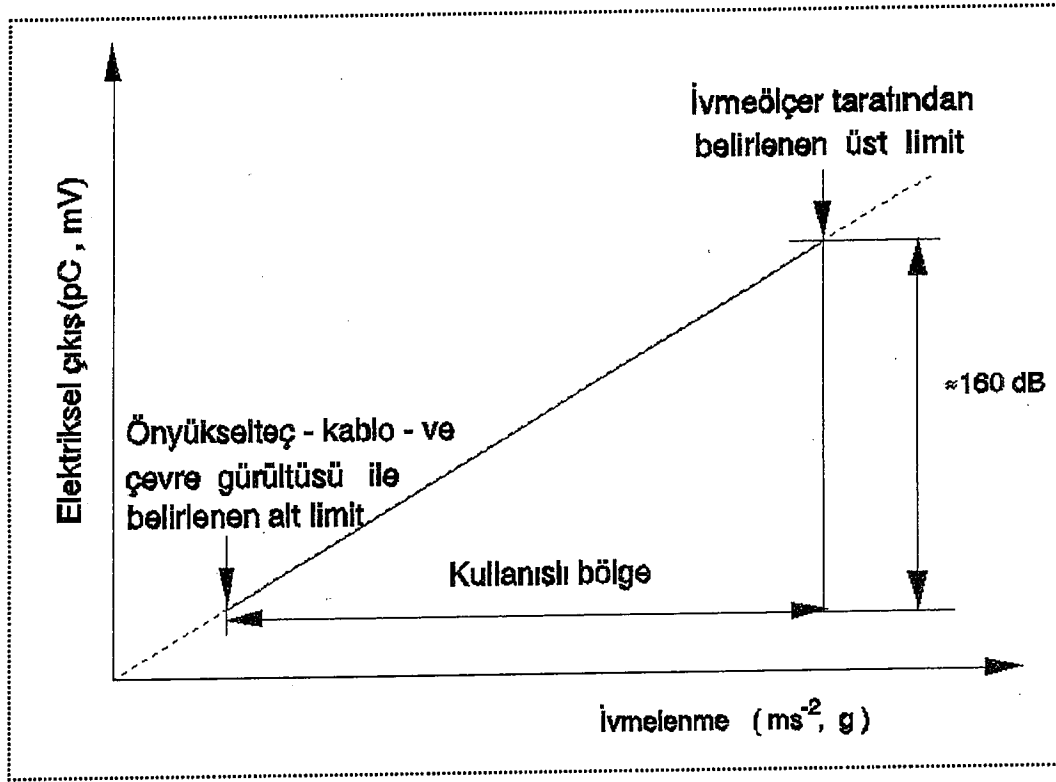
6.3.6.2 Birim Kazanç Hassasiyeti

Birim kazanç hassasiyetinin anlamı, ivme ölçerin ölçülen hassasiyetleri 1; 3.16; 10 veya 31.6 pC/ms⁻² gibi bilinen değerlerin % 2'si içinde ayarlanmış olması demektir. Birim kazanç ivme ölçerlerle herhangi bir cihazın detaylı ayarlanmasını gerektirmeden bir ivme ölçer aynı tip olan bir başkası ile değiştirilebilir. Çünkü yukarıdaki değerler birbirlerine göre rölatif olarak 10 dB farklı olduklarından ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu çok kolaydır. Örneğin bir ivme ölçer diğer farklı bir tip ile değiştirilirse

ölçüm cihazı üzerinde 10 dB'lık sabit kazanç değişikliği gerekli olacaktır. Birim kazanç hassasiyetleri, sismik elemanların kütlelerini dikkatlice ayarlayarak yapılır.

6.3.6.3 Lineerlik ve Dinamik Bölge

Lineerlik, herhangi bir ölçüm sistemin temel bir gereksinimidir. Sistemin çıkışı ihtiyaç duyulan geniş bir frekans ve dinamik bölge için giriş ile lineer ilişkili olmalıdır. Böyle bir lineer bağımlılık Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12 Lineerlik ve geniş dinamik bölgesi gösteren piezoelektrik ivme ölçerler için çıkış ve ivmelenme bağımlılığı.

Piezoelektrik ivme ölçer, piezoelektrik elemanların geniş bir dinamik bölgedeki

lineerlik performansından dolayı lineer cihazdır. Teorik olarak, ivme ölçer sıfır ivmelenişe kadar lineerdir. Fakat ölçüm sisteminde mevcut olan gürültü tarafından pratik olarak bir alt limit belirlenir. Gürültü orjini olarak bir kaç kaynağa sahip olabilir ve bunlar 4' de incelenecektir.

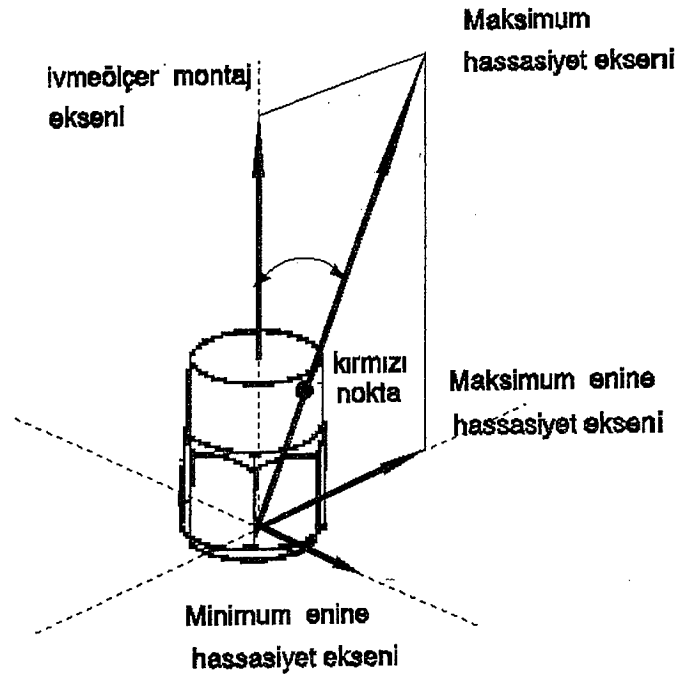
Bir ivme ölçer maksimum ivmelenme limitinin üzerinde çalıştırılırsa, performansı giderek lineer olmayan bir eğilim gösterir. Maksimum limitin çok uzaklarındaki seviyelerde ön yükleme halkası piezoelektrik elemanı sıkıp gevşetir ve sonunda kaide ile kısa devre yapar, dolayısı ile ivme ölçer kullanılamaz hale gelir. Pratikte ivme ölçer, belirtilen kullanım bölgesinin çok dışındaki şok seviyelere maruz bırakılmadığı takdirde böyle bir olay görülmez.

6.3.6.4 Enine Hassasiyet

Bir ivme ölçer monte edildiği eksene dik açıda uygulanan bir ivmeye maruz kaldığında bile ivme ölçerin bir çıkışı olacaktır. İvme ölçerin kalibrasyon bölgesinde enine hassasiyet ana eksen hassasiyetinin belirli bir yüzdesi olarak verilir. İdeal olarak bir ivme ölçerin yatay hassasiyeti sıfır olmalıdır. Fakat pratikte piezoelektrik elemanlarda ki ve metal parçalarda ki küçük süreksizlikler bunu önler. Bu yüzden homojen piezoelektrik seramiklerin seçimine, dikkatli imal edilmesine ve parlatılmasına özellikle dikkat edilir. Böylelikle, temiz ve düzgün bir yüzey üzerine monte etmekle' ivme ölçerin maksimum enine hassasiyeti 30 Hz'de ana eksen hassasiyetinin % 4'ün altında tutulabilir.

Ana ekseninde monte edilmiş rezonans frekansının 1/6' sından az olan frekanslarda enine hassasiyet % 10'nun altında tutulabilir. Ana eksenindeki monte edilmiş rezonans frekansının tam 1/3'ü frekanslarda enine rezonans belirlediğinden, enine hassasiyetin tam değerini belirtmek zordur.

Enine hassasiyet, ivme ölçerin maksimum yük ve voltaj hassasiyet ekseninin monte eksenine ile tam olarak ayarlanamamasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı birbirlerine ve ana hassasiyet eksenine dik olan maksimum ve minimum enine hassasiyet yönleri vardır. Bu yüzden ivme ölçerin kalibrasyon belgesinde enine



Şekil 6.13 Enine hassasiyetin vektörel gösterimi

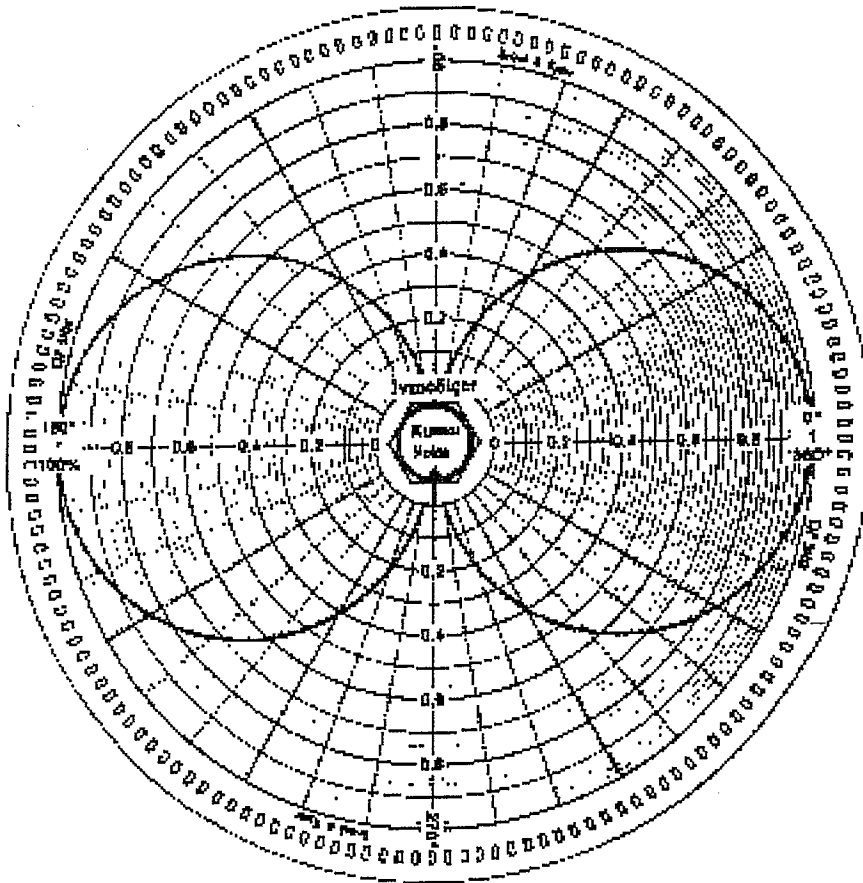
hassasiyetin maksimum değeri gösterilir. Minimum hassasiyet doğrultusu ivme ölçerin gövdesi üzerinde kırmızı bir nokta ile işaretlenmiştir. Tüm enine doğrultularda sabit rijitliğe sahip olan delta kayma dizaynının sadece bir enine rezonansa sahip olması bu tip ivme ölçerin sahip olduğu avantajlardan biridir.

Enine rezonans, kullanışlı çalışma frekans bölgesinin biraz dışında ve tepe genliği ana eksen hassasiyetinin hemen altında olduğundan, enine titreşimlerin ve şokların belirtilen ana ekseninde sürekli titreşim limitlerinden çok aşağıda tutulması önemlidir.

- kırmızı nokta, maksimum enine ivmeleniş doğrultusunda ayarlanabilir,
- ana eksen haricindeki diğer titreşimleri filtrelemek,
- maksimum enine hassasiyetten herhangi bir yöndeki titreşimlere karşı

hassasiyeti hesaplamak için Şekil 6.14'deki şemadan yararlanabilir.

- hassasiyeti hesaplamak için Şekil 6.14'deki şemadan yararlanabilir.

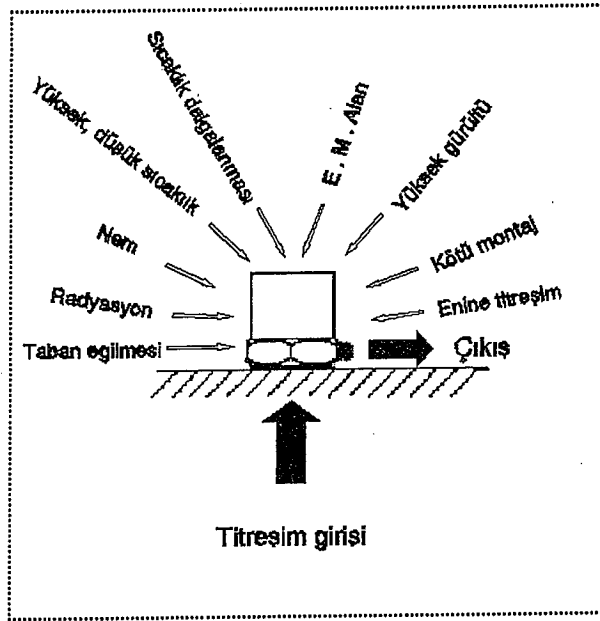


6.31

Bu bölümde güvenilir bir titreşim ölçümü gerçekleştirebilmek için piezoelektrik ivmeölçerin doğru kullanım şartları anlatılmaktadır. Şekil 6.15'de titreşim ölçümü sırasında bozucu etki yapabilecek dış etkiler gösterilmektedir. Delta kayma ivmeölçerleri hem bu dış bozucu faktörlerin etkisini minimize edebilmek hem de çıkışta, titreşim girişi ile ilgili çıkış elde etmek için tasarlanmışlardır. İki genel kriter göz önüne alınır.

- **Çevre** : Çevre koşullarından etkilenmeyecek bir titreşim transdüseri yoktur. Ama bazı detaylı çalışmalar göstermiştir ki çevre şartlarına duyarlılığı en düşük olan delta kayma tipi ivmeölçerlerdir.

- **Montaj** : İvme ölçerin montaj tekniği dinamik aralığını ve frekans cevabını azaltabilir. Buna ek olarak ivmeölçerin montaj konumu kadar ivmeölçer kütlesine de dikkat edilmelidir.



Şekil 6.15 Kötü dizayn edilmiş bir titreşim çeviricisinde, titreşimle ilgili olmayan çıkışlara sebep olabilecek dış etkiler.

6.3.7.1 Çevresel Etkiler

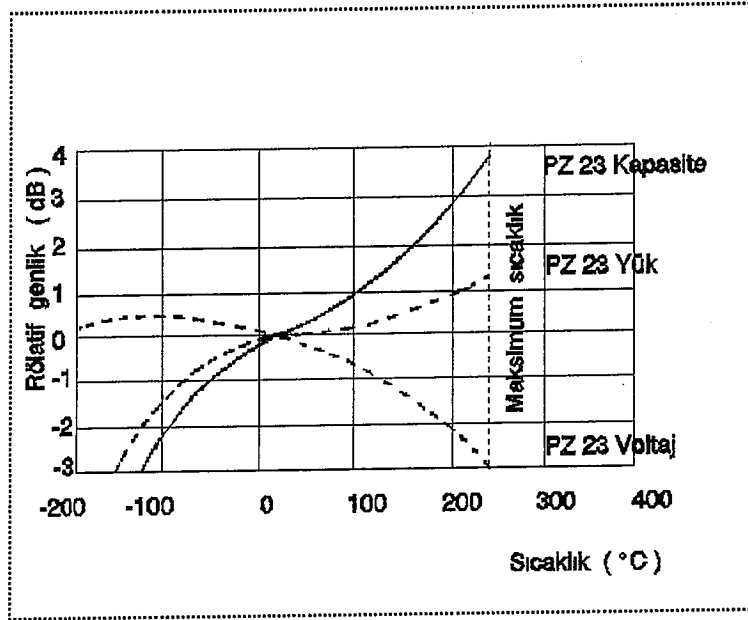
Titreşim ölçümleri, ivme ölçere bağlanan özel bazı birimlerle yapılmak zorundadırlar. Güvenilir bir ölçüm yapabilmek için tüm çevresel etkilerin maksimum etkisi göz önüne alınarak dizayn edilen ivmeölçerlerin kullanılması çok büyük önem taşır. Örneğin, yoğun çevre etkilerine olan düşük duyarlılığın yanında çok yüksek sıcaklık veya kuvvetli manyetik alan etkileri hesaplandığında ölçülen tüm titreşim seviyesine etkisi tahmin edilebilir.

6.3.7.2 Sıcaklık Aralığı

Piezoelektrik ivme ölçerler geniş bir sıcaklık aralığında titreşim ölçümü yapabilirler. Bununla beraber piezoelektrik malzemelerin özelliklerine dayanarak referans sıcaklık haricinde ivmeölçer çalıştırıldığında empedansında olduğu gibi voltaj ve yük duyarlılığında da değişimler oluşacaktır. Örneğin PZ23 piezoelektrik malzemesinin voltaj, yük duyarlılığındaki ve kapasitesindeki değişim Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Genel olarak piezoelektrik malzeme ile ilgi bu tip bilgiler ivme ölçerin beraberinde verilen kalibrasyon çizelgelerinde mevcuttur. Sıcaklık olması gerekli kalibrasyon sıcaklığında kaldığı sürece çok büyük değişiklikler görülmez ve duyarlılıkta bu bölgede olabilecek değişiklikler çok iyi bir şekilde tanımlanmıştır. Bu diyagramlar kullanılarak ivmeölçerlerin yüksek sıcaklıklardaki gerçek duyarlılıkları elde edilebilir.

Kalibrasyon grafiğindeki duyarlılığın tek durumlu hale dönüşü için gerekli zaman kısmen ivme ölçerin alındığı sıcaklığa bağlıdır. Eğer çevre sıcaklığı yavaşca değişirse ivme ölçerin duyarlılığında Şekil 6.17'de gösterilen eğriyi takip edecektir. Bununla beraber piezoelektrik malzeme ani sıcaklık değişimlerinde histerisiz etkisi gösterecek ve ivme ölçerin grafikte belirtilen duyarlılığa ulaşması belli bir zaman alacaktır. Genelde maksimum çalışma sıcaklığından oda sıcaklığına aniden dönen bir

ivmeölçerin kalibre edilmiş duyarlılığına dönmesi için 24 saatlik bir zamanın geçmesi gereklidir.

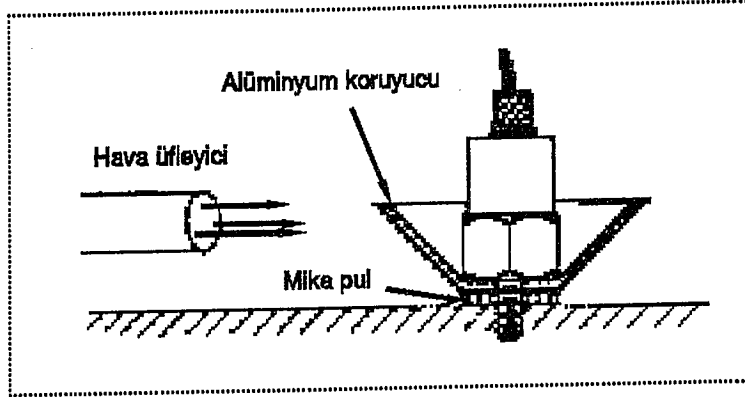


Şekil 6.16 PZ 23 piezoelektrik malzemenin kapasitans, yük ve voltaj hassasiyetinin sıcaklık bağımlılığı.

Her ivme ölçerin belirlenmiş ve bunun üzerinde piezoelektrik elemanın özelliğini kaybetmeye başlayacağı ve duyarlılıkta sürekli değişikliğe sebep olabileceği bir maksimum çalışma sıcaklığı vardır. Bu limit PZ 23 piezoelektrik malzemesini kullanan ivmeölçerler için 250 °C'dir. 50 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda belirlenen limit üzerinde kayıp kademelidir. Eğer daha yüksek olursa ani polarizasyon olur ve ivme ölçer bozulur.

Endüstriyel amaçlı olarak imal edilmiş ve sıcaklık limiti 400 °C'ye kadar çıkabilen ivme ölçerlere rastlamak mümkündür. Şekil 4.3' de görüldüğü gibi yüksek ısı iletkenliği olan sıcak titreşim yüzeyinden genel amaçlı ivme ölçerin tabanını ısı olarak izole etmek mümkündür. Bu ivme ölçere olan ısı transferini önler. Eğer ivme ölçere

yönlendirilmiş bir soğuk hava akımı varsa sıcaklık limiti 450 °C' ye kadar çıkar.

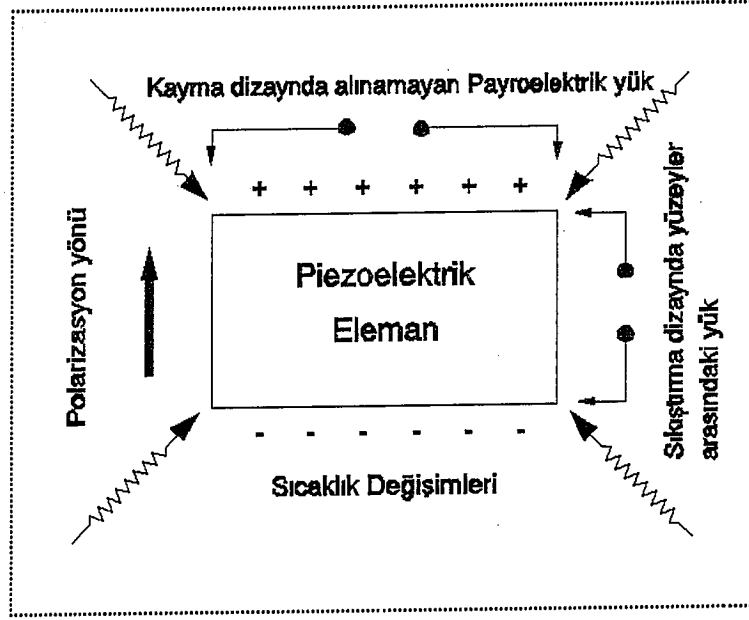


Şekil 6.17 İvmeölçerin ısı kaybını arttırmak için alüminyum zırhlama kullanarak sıcak bir yüzeye montajı.

6.3.7.3 Kısa Süren Sıcaklık Dalgalanması

Titreşim ölçümü sırasında çevre sıcaklığındaki oldukça ani dalgalanmalar ivme ölçerde düşük frekanslı gürültü sinyali yüklemesine sebep olabilirler. Bunların sonuçları ise iki madde altında incelenebilir.

- **Piroelektrik Etki :** Bu olay sıcaklık farklılıkları ve ani sıcaklık değişimleri ile piezoelektrik kristal ve ferroelektrik seramik sarj olduğu zaman görülür. Yapay kutuplandırılmış seramiklerde ise bu yük, kutup yönüne dik olarak yüzeyde oluşur. Bundan dolayı titreşim nedeniyle oluşan yük, baskı dizaynında olduğu gibi, polarizasyon yönüne dik olarak çekilir. Bununla beraber kaymaşılmiş tasarımda bu ek yük, yük toplama noktaları yüzeyde polarizasyon yönüne paralel olduğundan, toplanamaz. Bunun direkt sonucu olarak kayma tip ivmeölçerler teorik olarak kısa süreli sıcaklıklara duyarsızdırlar. Pratikte ise baskı tipi ivme ölçerlere göre kısa süren sıcaklığa göre bin kez daha az duyarlıdırlar. Bu Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18 Sıkıştırma dizayn ile karşılaştırılan kayma dizaynda, piezoelektrik malzemenin sıcaklık dalgalanmalarına olan tepkisi. Yüzeylerde oluşan yük pyroelektrik etkiden dolayı meydana gelmiştir.

- **Düzgün Olmayan Sıcaklık Genleşmesi** : Bu olay, ivmeölçerin parçalarının yapısı değişik hızlarda genişler veya büzülürse veya yapı sürekli sıcaklık değişimine maruz bırakılırsa mümkündür.

Her iki olay sonucunda piezoelektrik eleman üzerinde zorlama yapar ve çıkışlarında etkiler. Bu etkiler pratikte daha çok baskı tipi ivmeölçerlerde görülmektedir. Ama unutulmamalıdır ki bu etkiler düşük frekanslı titreşimler ölçüldüğünde dikkate alınacaktır. Bir çok endüstriyel uygulamada ise ölçümler yüksek titreşim seviyesinde yapıldığından mevcut sıcaklık dalgalanmaları çok ciddi olmayacaktır. Aşağıdaki metodlardan biri veya birkaçı kullanılarak sıcaklık dalgalanmalarının sebep olduğu düşük frekanslı gürültü azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir.

- **Doğru Seçim** : Yapılacak işe uygun ivme ölçerin seçimi geçici sıcaklık

değişimine karşı alınacak en etkili tedbirdir.

- **Yüksek Geçiren Filtreler** : Baskı tipi ivmeölçerlerde meydana gelen sanal alçak frekans çıkışı yok etmek için yüksek geçiren filtre kullanılması gereklidir.
- **Zırlama** : Bazı durumlarda ivmeölçerin etrafına bir ekran veya termal emici yerleştirmek mümkündür.

6.3.7.4 Akustik Duyarlılık

Titreşim ölçümleri yüksek ses basıncını bulunduğu ortamlarda da yapılabileceği için titreşimler akustik çıkışlar ile de birleşirler. Bu yüzden delta kayma tipi ivmeölçerler akustik etkiyi elimine edecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Böylece yüksek ses basınç seviyelerinde titreşim ölçümü mümkün kılınmıştır. Baskı tipi ivmeölçerler piezoelektrik disk ile titreşim yüzeyi arasında mekanik izolasyon olmadığından bu tip ivme ölçerler mikrofona gibi davranırlar. Birçok olayda akustik etkilerden kaynaklanan titreşim dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

6.3.7.5 Kaide Gerilmeleri

Bir ivmeölçer titreşen bir yapının üzerine kurulduğu zaman, tabanı gerilme kuvvetlerine maruz kalabilecek ve bir sonuç yükü ölçülebilecektir. Bu yükün frekansı her zaman için titreşim frekansında olacaktır. Sonuç olarak, yer değiştirmenin ve gerilmelerin büyük olduğu yerler düşük frekanslıdır ve her zaman dikkate alınmaları gerekmektedir. Endüstriyel uygulamalarda delta kaymalı dizaynlar kullanılarak bu etkilere düşük duyarlılık sağlanmıştır. Bu dizaynda piezoelektrik elemanlar tabanın tüm deformasyonlarından efektif olarak izole edilmişlerdir. Baskı dizaynında kullanılan kalın ve ağır tabanlar bu etkiyi minimize etmek için yeterli değildir. Baskı dizaynı referans ivmeölçerlerde, taban gerilme etkisinden piezoelektrik elemanları izole etmek için berilyum diski kullanılır.

6.3.7.6 Nem Etkisi

İvmeölçerleri nem etkisinden efektif olarak izole etmek için kaynaklanmış veya epoksi kılıfları vardır. Islak veya çok nemli ortamlarda yapılan ölçümlerde sadece ivmeölçerin zırhlı olması yeterli değildir, aynı zamanda diğer bağlantı elemanlarının da korunması veya ortam şartlarına uygun seçilmesi lazımdır.

6.3.7.7 Manyetik Duyarlılık

Genelde ivmeölçerler manyetik alana karşı duyarsız olmakla birlikte kullanılan çeşide ve dizayn farklılıklarına göre duyarlılıkları $0.5 - 30 \text{ ms}^{-2} / \text{Tesla}$ arasında değişmektedir.

6.3.7.8 Radyasyon Etkisi

Line - drive dizaynı hariç diğer tüm dizaynlarda tüm kullanım için verilen üst radyasyon limiti 20 kGy 'dir ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$). Radyasyona uğramış bir ivme ölçerin duyarlılığında % 10'a varan azalma görülür.

6.4 **Titreşim Önyükselteçleri**

Titreşim önyükselteçleri, ivme ölçerin yüksek empedanslı çıkışlarını ölçerek analiz cihazları için uygun olan düşük empedanslı sinyallere çeviren ve titreşim analizinde önemli rol oynayan cihazdır. Bu özelliklerine ek olarak önyükselteçler, aşağıdaki işlevlerin bazılarını veya hepsini gerçekleştirebilirler.

- İvme ölçerin çıkışı ile ölçme cihazının giriş duyarlılığını uyumlaştırıcı görevi vardır.

- Titreşim sinyalini güçlendirip, istenilen tüm sistem duyarlılığını sağlar.
- İvme ölçer çıkışını integre ederek, hız ve yerdeğiştirme sinyalinin elde edilmesini sağlar.
- Önyükseltecin girişinde ve çıkışında olabilecek aşırı yüklenmeler için uyarıcıdır.
- İstenmeyen sinyaller için alçak ve yüksek sinyal filterler.

6.4.1 Önyükselteç Dizaynı ve Çalışma Prensipli

Piezoelektrik ivmeölçerlerle beraber kullanılan, temel iki çeşit önyükselteç mevcuttur.

- **Yük önyükselteçleri** : Bu tip önyükselteçler, giriş yükü ile orantılı çıkış voltajı üretirler. yükü kuvvetlendirmezler.
- **Voltaj önyükselteçleri** : Bu tip önyükselteçler, giriş voltajı ile orantılı çıkış voltajı üretirler.

Yük önyükselteçleri, voltaj önyükselteçlerine göre daha çok tercih edilen sistemlerdir. Bunun en önemli sebebi ise, yük önyükselteçleri ile ister çok uzun ister çok kısa kablo ile kullanılırsa kullanılsın tüm sistemin hassasiyetinde bir değişim olmaz. Buna karşılık voltaj önyükselteçlerinde ise, kablo değiştirildiği zaman sistemin yeni durumu için yeni bir hassasiyet belirlemesi gerekmektedir.

6.4.2 Yük Önyükselteçleri

Yük önyükselteçlerinin içlerinde işlemsel kuvvetlendirici vardır. Bu işlemsel kuvvetlendiricinin bünyesinde geri besleme kolunda bulunan kapasitör, bir integratör

olarak çalışır ve akım girişini integre eder. Bu giriş akımı, ivmeölçerin içinde bulunan yüksek empedanslı piezoelektrik elemanda meydana gelen yük sonucunda oluşturulur. Yükselteç bu akımı dengelemeye çalışırken yükle orantılı çıkış voltajı üretir.

6.4.3 *Voltaj Önyükselteçleri*

Voltaj önyükseltecinin çıkış voltajı, giriş voltajı ile orantılıdır ve ivmeölçer bir voltajkaynağı gibi davranır. Kablo kapasitansındaki değişiklikler sistemin tam hassasiyetini ve giriş direncindeki değişiklikler düşük frekans cevabını etkiler.

Voltaj önyükselteci ivmeölçer kapasitansındaki titreşim sonucu voltaj değişimlerini algılar ve bununla orantılı çıkış voltajı üretir. Voltaj önyükselteçleri yük önyükselteçleri ile karşılaştırıldığı zaman daha basit ve daha ucuz olmalarına rağmen kullanım açısından bazı dezavantajlara sahiptir.

6.5 **Titreşim Ölçümleri**

Titreşim ölçümlerinin dört geniş kullanım sahası vardır:

- Titreşim ölçümü; bir parçanın gerçek şartlarda karşılaşacağı titreşime dayanıp dayanamayacağı testidir. Bu özellik frekans taranarak yapılır.
- Frekans analizi; teşhis amacı ile kullanılmakta olan bu metot ile bir sistemin titreşim karakteristiklerinde meydana gelen herhangi bir değişiklik spektral analiz ile incelenir.
- Yapısal analiz; yapıların dinamik davranışlarını belirlemek için titreşimlerin ve etkilerinin ölçülmesi esasına dayanır.
- İnsan sağlığına yönelik ölçümler.

6.5.1 *Titreşimle İlgili Standartlar*

Günümüzde Titreşim ve Şok ile ilgili Türk Standartları şunlardır:

TS 2576 (Mart 1977) - Döner Rijit Elemanların Balans Niteliği:

Bu standard döner rijit elemanlarının balans özellikleri ve bunlarla ilgili, maksimum çalışma hızının fonksiyonu, müsaade edilen kalıcı balanssızlık değerleri hakkındaki isteklere aittir. Ayrıca istenen balans kalite derece aralıklarına bağlı olarak dönen elemanların çeşitleri tiplerinin sınıflandırılmasını kapsamaktadır.

TS 2773 (Nisan 1977) - Döner Elektrikli Makinelerin Havada Oluşturduğu Gürültüyü Ölçmek İçin Deney Kodu:

Bu standard aşağıdaki iki deney bölümünü kapsamaktadır:

- Bölüm 1. Ses seviyesi ölçmelerine dayanan normal deneyler için yöntemler.
- Bölüm 2. Frekans bandı analiz ölçmelerine dayanan özel deneyler için yöntemler.

TS 2774 (Nisan 1977) - Titreşim ve Şok - Terimler ve Tarifler:

Bu standard, titreşim ve şok ile ilgili terimlerin tarifine dairdir. Bu terimler standardın sonunda Türkçe, İngilizce ve Fransızca olarak alfabetik sıraya göre düzenlenmiştir.

TS 2775 (Nisan 1977) - Tüm Vücudun Titreşim Etkisi Altında Kalma Durumunun Değerlendirilmesi İçin Kılavuz:

Bu standard katı yüzeyler aracılığıyla iletilen 1-80 Hz frekans aralığındaki etkisi altında kalınan titreşimler için sınır değerlerinin tamamlanmasına bu değerlerin sayısal büyüklüklerle ifade edilmesine ve değişik koşullarda etkisi altında kalınmasına izin verilebilecek titreşimler için sınır değerlerin saptanmasına yardımcı olacak bir kılavuzun oluşturulmasına dairdir.

TS 2776 (Nisan 1977) İzalatörler - Mekanik İzalasyon Özelliklerinin Belirlenmesi, Esnek Sistemlerin Seçimi ve Kullanılması İçin Genel Kurallar:
Bu standard, titreşim ve şok tekniğinde izalasyon için kullanılan esnek sistemlerin seçimi ve uygulamasında, uygulayıcı ve yapımcı arasında teknik bilgi alışverişinde gerekli olan kurallara dairdir.

TS 2779 (Nisan 1977) - Dönen ve Pistonlu Makinelerde Mekanik Titreşim, Titreşim Şiddeti Ölçme Cihazları İçin Aranılan Koşullar:
Bu standard, makinelerin titreşim şiddetini ölçen bir cihazın, özellikle bir makineyi diğer bir makine ile karşılaştırırken, ölçme hatalarının belirtilen değerlerden fazla olmaması için gerekli koşullara dairdir.

TS 2782 (Nisan 1977) - Çalıştırma Hızları 10 - 200 Devir / Saniye Olan Makinelerin Mekanik Titreşimi - Değerlendirme Standardlarını Belirtmek İçin Temel Esaslar:
Bu standard, 10 ile 200 devir arasında çalışan makinelerin mekanik titreşimlerinin değerlendirmelerinde benzer makinelerde yapılan benzer ölçmelerin karşılaştırılabilmesini sağlayacak şekilde, kullanılacak kuralların temel esaslarına dairdir.

TS 2843 (Ekim 1977) - Dengeleme - Terimler ve Tarifler:
Bu standard, dengeleme ile ilgili terimlerin tarifine dairdir. Bu terimler standardın sonunda Türkçe, İngilizce ve Fransızca olarak alfabetik sıraya göre düzenlenmiştir.

TS 2844 (Ekim 1977) - Yerinde Dengeleme Cihazı Tanımlama ve Değerlendirme:
Bu standard, yerinde dengeleme için kullanılan cihazların tanımlanması ve değerlendirilmesi için gerekli kurallara dairdir.

TS 2873 (Kasım 1977) - Dengeleme Makineleri Tanımlama ve Değerlendirme:

Bu standard, dönen parçaların mil eksenine dik bir veya birçok düzlemlerinde gerekli düzeltme yapılarak dengelenmeleri için kullanılan makinelerin performanslarının ve özelliklerinin değerlendirilmesine dairdir.

TS 3967 (Nisan 1983) - Mil Yüksekliği 80 mm - 400 mm Arasında Olan Bazı Döner Elektrik Makinelerinin Mekanik Titreşimi - Titreşim Şiddetinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi:

Bu standard, mil yüksekliği 80 mm - 400 mm arasında olan bazı döner elektrik makinelerinin mekanik titreşimlerine ve titreşim şiddetinin ölçülmesi ve değerlendirilmesine dairdir. Standard mil yüksekliği 80 mm - 400 mm arasında olan doğru akım makinelerine ve üç fazlı alternatif akım makinelerine uygulanır.

TS 7548 (Ekim 1989) - Hızları 10 Devir/s - 200 Devir/s Olan Döner Büyük Makinaların Mekanik Titreşim - Kullanım Yerinde Titreşim Şiddetinin Ölçme ve Değerlendirme Kuralları :

Bu standard, dönüş hızları 10 - 200 devir/s olan döner büyük makinaların titreşim şiddetinin ölçme ve değerlendirmesiyle ilgili kurallara dairdir. Her titreşen parçanın çıkardığı ses enerjisi ile ilgili konuları kapsamamaktadır. İlgilenilen titreşim makinaların yüzeyinde ve yataklarında 10 ile 1000 Hz frekans aralığında oluşan titreşim ile ilgilidir.

6.5.2 Titreşim Seviyesini Belirlemek İçin Parametre Seçimi

Titreşim seviyesini tesbit etmek için, titreşimi karakterize eden parametreleri ölçülmesi gerekmektedir. Genellikle titreşim parametrelerinden en sık ölçülen ivmedir. Fakat elektronik integrator kullanarak ivme kolayca hız ve yerdeğiştirme sinyallerine

dönüştürülür. Ayrıca modern titreşim ölçüm cihazları bu iç parametrelerin hepsini ölçme imkanı sağlamaktadırlar.

Eğer titreşim sinyali bir çok frekans bileşeni içeriyor ise, ölçülecek parametrenin seçimine dikkat edilmelidir. Örneğin, yerdeğiştirme ölçümü düşük frekanslı bileşenler ağırlıklı bir sonuç verecektir, ivme ölçümlerinin sonucunda ise yüksek frekanslı bileşenlere ağırlık olacaktır. Çeşitli deneylerin sonucunda gösterilmiştir ki, 10 Hz ile 1000 Hz frekans aralığındaki titreşim seviyesinin tesbiti için en doğru sonucu veren hız ölçümleridir. Belirli bir titreşim enerji düzeyi açısından, düşük ve yüksek frekanslı hız bileşenlerinin aynı ağırlıkta olmaları bu olayın muhtemel açıklaması olabilir. Günlük hayatımızda karşılaştığımız makinelerin çoğu düzgün hız spektrumuna sahiptirler.

Ölçüm cihazının dinamik bölgesini (ölçülebilen en büyük ve küçük değerler arasındaki fark) en iyi kullanmak için, düzgün frekans spektrumu veren parametrenin seçimi bir avantajdır. Hız ya da ivme parametresi, normalde frekans analizinde seçilir. İvme ölçümleri, yüksek frekans titreşim bileşenlerinin ölçümlerinde kullanılır.

Mekanik sistemlerde, sezilebilir yerdeğiştirme sadece düşük frekanslarda ortaya çıkar. Bu nedenle yerdeğiştirme ölçümleri, genel mekanik titreşim çalışmalarında kısıtlı düzeydedir. Makina elemanları arasında küçük aralık olduğunda, tabiidir ki titreşim yerdeğiştirmesi önemlidir. Yerdeğiştirme, genelde dönen makina parçalarında balansırlığın bir göstergesi olarak kullanılır. Çünkü rölatif büyük yerdeğiştirmeler daima şaft dönme frekansındadır.

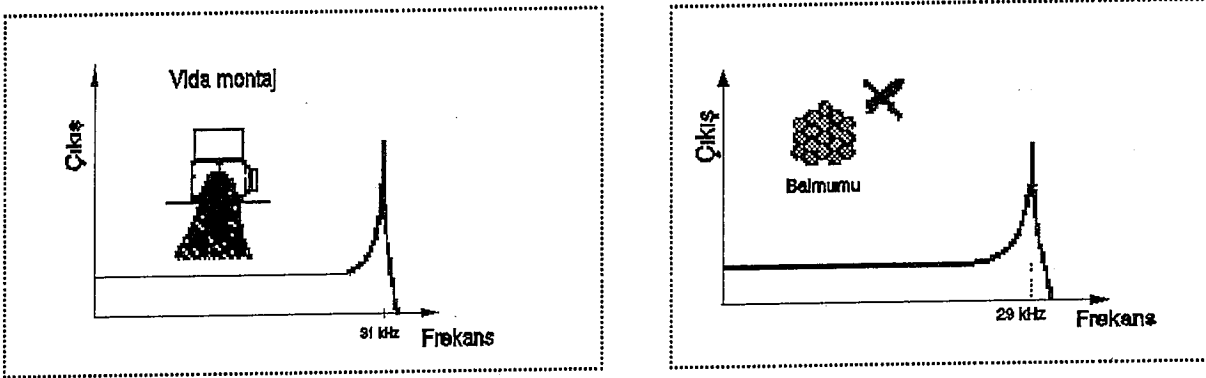
6.5.3 İvme Ölçer Monte Konumunun Seçilmesi

İvme ölçer, istenilen ölçüm yönü ile ivme ölçer ana hassasiyet ekseninin birleştiği yere monte edilmelidir. İvme ölçer çok az da olsa yatay doğrultudaki titreşimlere de

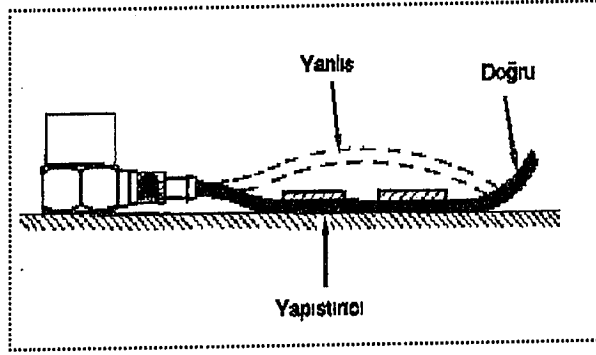
duyarlıdır. Ancak, enine hassasiyetleri çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Bir makina üzerinde titreşim ölçme sebebi daima ölçüm noktasının konumunun belli yerlerde olmasını zorlayacaktır. Örneğin dönen bir şaftın yatak kısmını ele alalım. Burada, şaft ve yatağın çalışma durumlarını izleyebilmek için ivme ölçümleri kullanılır. İvme ölçer, yataktan gelen titreşimi alacak bir konumda monte edilmelidir.

Şöyle bir soru akla gelebilir. Söz konusu makina parçasının hangi doğrultusunda ölçüm yapılmalıdır. Genel bir kural vermek mümkün değildir, ancak örnek olarak bir yatağın titreşimini izlemek için hem eksen hem de radyal doğrultuda ölçüm yapılabilir. Mekanik nesnelerin zorlanmış titreşimlere tepkisi karmaşık bir olay olduğundan, bilhassa yüksek frekanslarda aynı makina elemanı üzerinde farklı titreşim seviyeleri ve frekans spektrumları elde edilebilir.

Titreşim ölçümlerinde ivme ölçerin montajındaki diğer bir önemli nokta montaj şeklidir. Titreşim düzeyi ölçülecek cihazın durumuna ve frekans bölgesine bağlı olarak çeşitli montaj şekilleri vardır. Bu montaj şekilleri Şekil 6.19 gösterilmektedir.



Şekil 6.19a İvme ölçer montajları



Şekil 6.19b İvme ölçer kablosunun montajı

6.5.4 Titreşim Ölçüm Cihazları

Portatif, genel amaçlı titreşim ölçerler en uygun titreşim ölçüm cihazlarıdır. Alanda titreşim ölçümleri uygun ses düzeyi ölçerler kullanarak yapılabilir. Mikrofon, integratör adaptörü ve ivmeölçer ile değiştirilerek yer değiştirme, hız ve ivmenin RMS düzeyi ölçülebilir. Fakat ses düzeyi ölçerler, yük yükselteç girişine uyumlu olmadığından her ölçüm parametresi için ayrı ayrı kalibrasyon ihtiyacı duyarlar. Pul ile çalışan filtreler sisteme eklenerek oktav, 1/3 oktav ve darband analizinin yapılması imkanı sağlanır.

Şebeke voltajı ile çalışan laboratuvar cihazları, özellikle detaylı analizlerde oldukça kapasitelidir. Şekil 6.20'de görüldüğü gibi basit bir ölçüm zincir

- ivme ölçer
- yükselteç
- ölçüm yükselteç
- bir dış filtre

cihazlarından oluşur. Yükselteç, ölçüm yükseltici ve filtre birleştirildiğinde frekans analizörü veya spektrometre adı verilen bir cihaz oluşur. Frekans analizörlerinin en son hali gerçek zaman analizörleridir. Dijital çıkış ve kontrol edilebilme özelliklerine

sahip olduğundan otomatik analiz imkanı vardır.

6.5.4.1 Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu

Ölçüm sistemi, ölçümlerden önce ve sonra kalibre edilmelidir. Burada bahsedilen kalibrasyon; ivme ölçer, önyükselteç ve gösterge bölümünün hassasiyetinin kontrolüdür. Bu tüm kalibrasyonlar seviyeleri sabit olan titreşim kalibratörleri ile yapılır. Ticari olarak, 159.2 Hz'de 10 m/s'l'lık seviyeye sahip kalibratörler mevcuttur.

İvme ölçer, kalibratör üzerine monte edilir. Ölçüm sistemi kalibratörün seviyesini toleransları içinde göstermelidir. İvme ölçerin hassasiyetini belirtmek için kalibrasyonu yapıldığında referans ivme ölçere ihtiyaç olacaktır. Aynı titreşim seviyesinde titretilen ivme ölçerlerin çıkışları oranı, hassasiyetleri oranına eşittir.

$$\frac{V_{ref}}{V_x} = \frac{Hassasiyet_{ref}}{Hassasiyet_x}$$

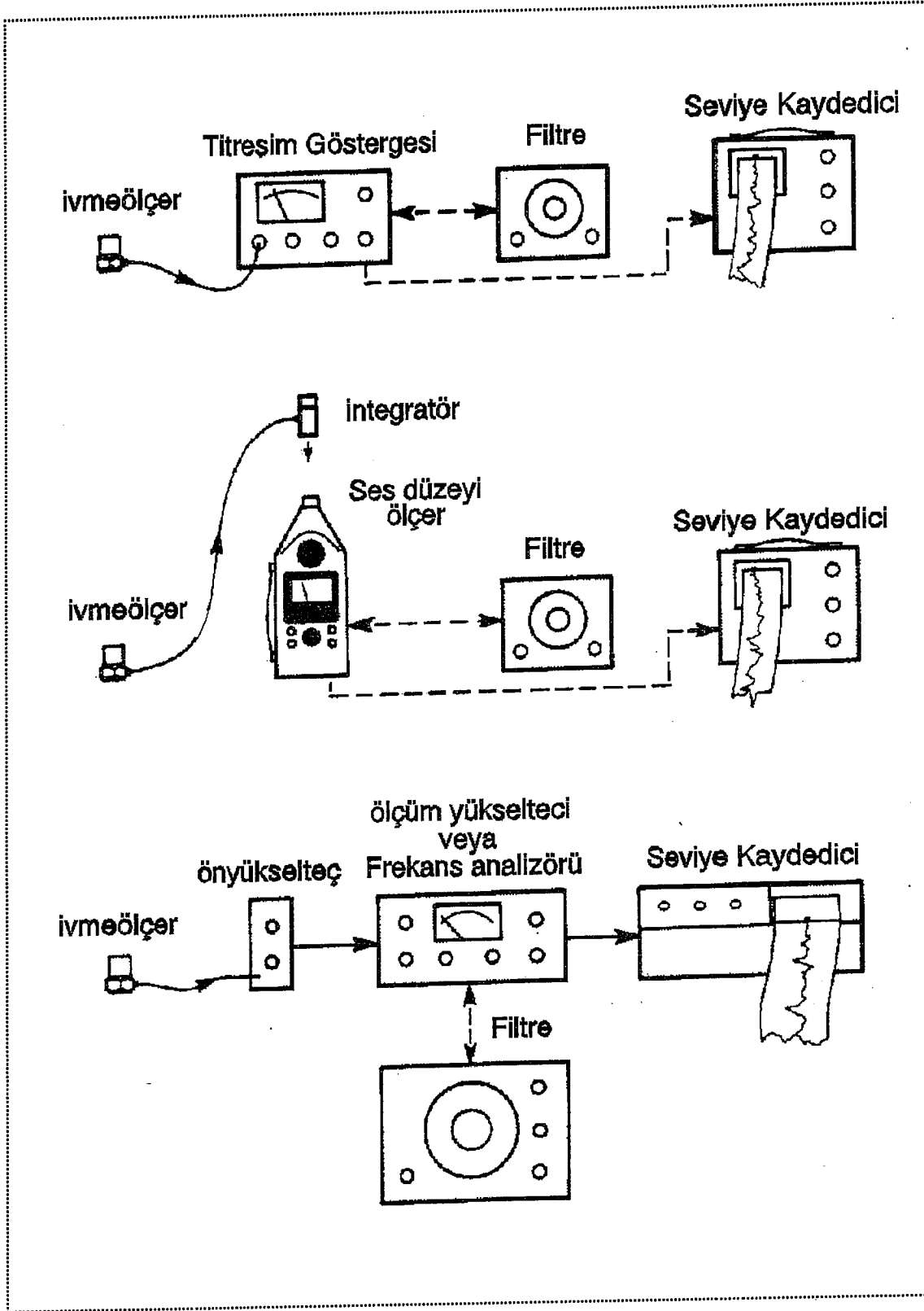
İvme ölçerlerin, kullanım sıklıklarına bağlı olarak genel kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir.

Yapılan ölçümlerde elde edilen hız ve ivme değerlerini skalasında da ifade etmek mümkündür. İvme için;

$$L_a = 20 \log (a/a_0) \text{ dB}$$

$$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}_2$$

hız için,



Şekil 6.20 Titreşim ölçüm cihazları

$$L_v = 20 \log (V/V_0) \text{ dB}$$

$$V = 10^{-9} \text{ m/s}$$

ifadeleri kullanılır.

6.5.5 Titreşim Frekans Analizi

Basit titreşim ölçerler, geniş frekans bandı üzerinden ölçülen tek bir titreşim düzeyi verirler. Geniş bandı oluşturan her bir frekans bileşenini elde etmek işi, frekans analizidir. Bu nedenle, filtreler kullanılır. Bu filtrelerden, o banda ait titreşim bileşenleri geçer. Her geniş bandı oluşturmak için, filtrenin geçiren bandı hareket ettirilir ve ilgi duyulan her bir dar bantdaki titreşim seviyesi ayrı ayrı okunur. Filtre bir çok, peşpeşe, sabit frekanslı filtrelerden oluşabilir. Peşpeşe düğmeye basarak frekans taraması yapılır. Diğer bir tip filtre ise tek bir ayarlanabilir filtredir.

6.5.5.1 Frekans Analiz Metodunun Seçimi

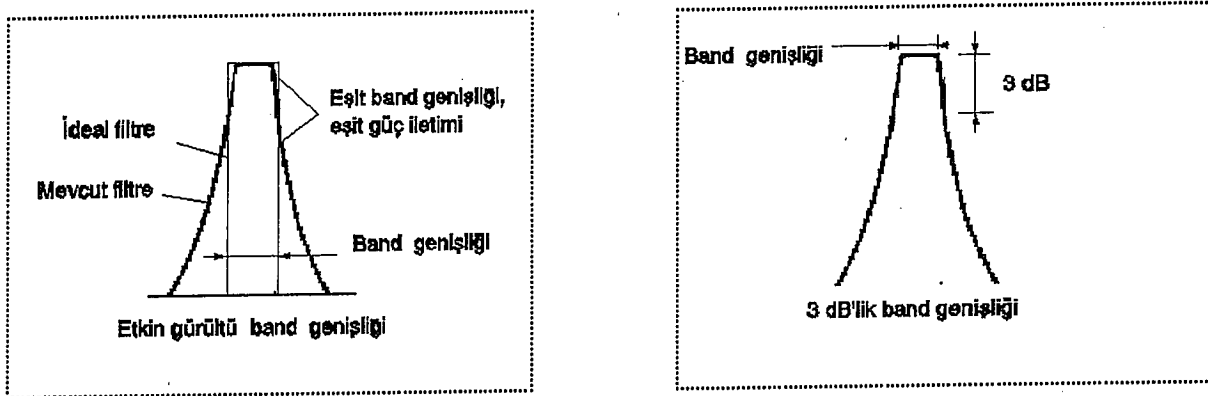
Titreşim sinyallerinin frekans analizinde kullanılan iki temel filtre tipi vardır. 3 Hz, 10 Hz v.b. gibi mutlak sabit band genişlikli olan sabit band genişlikli filtreler ve band genişliği ayarlanan merkez frekansının sabit yüzdesi olan sabit yüzde band genişlikli filtreler, örneğin % 3, % 10 vb. Hangi tip filtrenin kullanılması sorusuna net bir cevap yoktur. Sabit yüzde band genişlikli analiz, mekanik sistemlerin doğal tepkisini zorlanmış titreşimlere uyumlaştırma eğiliminde olup geniş frekans bölgesinin kağıt üzerine kaydedilmesi imkanı sağlar. Çok genel olarak titreşim ölçümlerinde kullanılan analiz metodudur.

Sabit band genişliği analizi, yüksek frekanslarda iyi frekans çözünürlüğü verir. Lineer

frekans skalasında kağıda çizildiğinde harmonikleri kıyaslamada önemlidir.

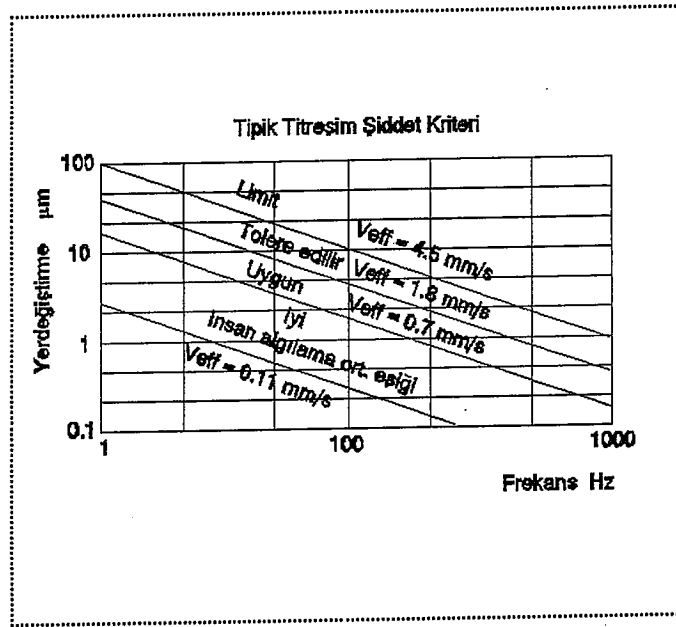
Filtrenin seçimi, band geçiriminin dağılışı, elde edilen frekans analizinin çözünürlüğünü kontrol eder. Daha dar bandlı filtre kullanmak suretiyle çok fazla detay elde edilir. Titreşimdeki tepe değerler izole edilebilir.

Filtrenin band genişliği daraldıkça, ölçümlerde gerekli olan belli bir doğruluğu elde etmek için geçen sürenin uzaması dar band genişlikli analizin detavantajıdır. Geniş bir frekans bölgesini dar band genişlikli analizörlerle taramak uzun zaman gerektiğinden, frekans spektrumun ilgi duyulan bölümünü ayırmak için genelde geniş band genişlikli ön analiz yapılır. Daha sonra dar band genişlikli analize geçilir. Yüksek frekanslarda, örneğin 3 Hz'lik band genişliğine ayarlanan sabit band genişlikli analizör oldukça detaylı analizin yapılmasını sağlarlar. İdeal bir filtre, band genişliği içinde olan tüm frekans bileşenlerini geçirip, diğerlerini geçirmez. Pratikte elektronik filtrelerin açılan sloopları olduğundan belirlenen band genişliği dışındaki frekans bileşenlerini tamamen elimine edemezler. Bu ise filtre band genişliğini nasıl belirleyeceğimiz sorusunu ortaya çıkartır. Filtre band genişliğini ölçmek için iki metod kullanılır. En sık kullanılan, beyaz gürültü kaynağından aynı enerjiyi geçiren ideal düz kenarlı genişliği gibi band genişliğini tanımlar. İkincisi ise filtre zayıflatmasının normal geçiş seviyesinden 3 dB az olan filtre karakteristiğini tanımlar.



Şekil 6.21 Titreşim ölçümlerinde kullanılan filtre tipleri

Tek, geniş frekans bandı titreşim ölçümleri, bir makinanın genel durumunu veya titreşim izolasyon tedbirlerinin verimliliğini belirlemede, kullanışlı bir titreşim göstergesidir. Ölçülen gerçek değer önceki veya sonra ölçülen seviyelerle ya da yayınlanan şiddet kriteri ile karşılaştırılır. Böyle bir karşılaştırma Şekil 6.22'de verilmektedir (ISO 2372&, 2373, VDI 2056:1964, BS 4675:1971 ve DIN 45665:1968).



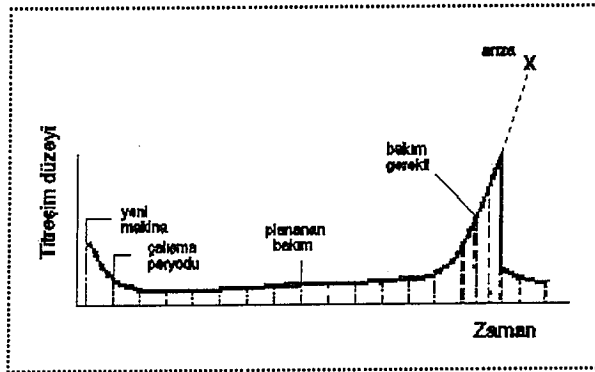
Şekil 6.22 Titreşim kriteri

Diyagnostik amaçlı olarak, örneğin ürün geliştirme açısından frekans analiz, model analiz gereklidir. Titreşim frekans spektrumundaki bazı frekans bileşenleri, hemen şaft dönme hızları, dişli frekansları vb. gibi özel nedenlere bağlanabilir. Ayrıca temel hareketle ilgili olan spektrumda önemli ek frekans bileşenleri bulunur. Bunlar temel frekansların harmonikleridir. Harmonikler temel frekansların distorsiyonundan ya da orjinal periyodik hareketin saf sinüsoidal olmayışından dolayı harmonikler ortaya çıkar. Eğer bu harmonikler, diğer makina elemanlarının rezonans frekanslarına denk gelirse,

büyük gürültü kaynağı olabilen veya makinanın diğer parçalarına kuvvet aktarımına neden olan önemli titreşim seviyeleri oluşabilir.

Dişli sistemlerde, yük altındaki dişler sapma yapar ve dişli frekansında ve harmoniklerinde artışa neden olur. Dahası yan band bileşenleri dişli kavrama frekansı (meshing) ve harmonikleri civarında oluşur. Birinci üst ve alt yan bandlar, dişli kavrama frekansı (f_t) $\pm$ dişli dönme frekansı (f_g)'da ortaya çıkacaktır. Bazen, şaft hızı, dişli oranı gibi kuvvet uygulayan frekansları değiştirmek pratik olmayabilir. Böylece istenmeyen titreşim düzeylerini indirmek için diğer metodlar kullanılır. Örneğin, makinanın kütlesini veya elasitesini değiştirerek; izolatörler kullanılarak titreşim aktarımını zayıflatarak ya da titreşim genliğini azaltmak için sönünleme malzemesi ilave ederek titreşim seviyeleri azaltılabilir.

Makinalar, nadir olarak herhangi bir işaret vermeden bozulur. Arıza işaretleri, makina kullanılmaz hale gelmeden önce uzunca bir süre mevcuttur. Makina arızaları, makinanın herhangi bir yüzeyinden ölçülen titreşim düzeyindeki artış ile karakterize edilirler. Şekil 6.23'de bir makinanın zamana karşı titreşim düzeylerini göstermektedir. Bu teknik endüstride, sürekli proseslerde geniş olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6.23 Bir makinanın zamana göre titreşim seviyesinin değişimi

Tamir öncesindeki mücade edilen titreşim düzeyi, tecrübe ile belirlenebilir. Genel

olarak tamir öncesi seviye, normal olarak kabul edilen seviyenin iki veya üç katı (6-10 dB yukarı) olması olarak önerilmektedir.

Titreşim sinyallerinin frekans analizinden, bir çok frekans bileşeninin kaynağını belirlemek mümkündür. Uyarıcı kuvvetler sabit olduğu veya belli limitler arasında değiştiği sürece, ölçülen titreşim düzeyi sabit veya benzer limitler arasında değişir. Herbir makinanın kendisine has tipik bir titreşim düzeyi ve frekans spektrumu vardır. O halde makinanın normal çalışma konumundaki frekans spektrumu, o makina için referans "iz" olarak kullanılabilir. Daha sonra yapılacak olan analizler eldeki mevcut referans iz ile karşılaştırılır. Böylelikle olacak arızaların hangi kaynaktan olacağı belirlenmiş olur.

Tablo 6.1 Çeşitli titreşim ölçüm uygulaması ve kullanılacak olan ivme ölçerin özellikleri

UYGULAMA ALANI		ÖLÇÜM ŞARTLARI	İVMEÖLÇER ÖZELLİĞİ
Kompresörler	Santrafüt	Normal ortam	
		Tehlikeli ortam	Güvenli
	Vidalı	Yüksek çevresel gürültü	İç monteli önyükselteç içeren
		Düşük çevresel gürültü	
	Karşılıklı	Yüksek dinamik seviyeler	Geniş dinamik bölge
Türbinler	Gaz	Tehlikeli ortam < 120 °C	Güvenli
		Yüksek sıcaklıklar < 250 °C	
		Yüksek sıcaklık	400 °C lik mak sıcaklık
	Buhar	Tehlikeli ortam < 120 °C düşük dinamik seviye	Güvenli
		Yüksek sıcaklıklar < 250 °C düşük dinamik seviye	
		Yüksek sıcaklık düşük dinamik seviye	400 °C lik mak sıcaklık
	Su	Çok düşük seviyeler	Yüksek hassasiyet
Elektrik motorları, Jeneratörleri		Elektrik alan etkisi, Topraklama hattı	Balanslı çıkış
			İzoleli kaide
		Tehlikeli ortam	Güvenli
İçten yanmalı motorlar		Yüksek dinamik seviye	Geniş dinamik seviye
Pompalar	Santrafüt	Normal ortam	
		Tehlikeli ortam	Güvenli
	Karşılıklı	Yüksek dinamik seviye	Geniş dinamik seviye
Fanlar		Normal ortam	
		Tehlikeli ortam	Güvenli
Mil yatakları	Bilya	Yüksek frekanslar	Geniş frekans bölgesi
	Journal	Düşük dinamik seviye	Yüksek hassasiyet

UYGULAMA ALANI	ÖLÇÜM ŞARTLARI	İVMEÖLÇER ÖZELLİĞİ
Pervane kanatları	Düşük dinamik seviye yüksek frekans	Yüksek hassasiyet geniş frekans bölgesi
Dişli kutuları	Yüksek frekans	Geniş frekans bölgesi
Darbe kaydetme	Çok eksenli	Üç eksenli
	Tek eksenli	
Şok seviyelerin izlenmesi	Çok yüksek dinamik seviyeler	Yüksek şok kapasitesi tek bağlantı vidası ve kablo
		Şok kapasitesi yekpare kablo
Yapı titreşim seviyesinin izlenmesi	Düşük dinamik seviye düşük frekanslar	Yüksek hassasiyet geniş geniş dinamik bölge
Gevşek eleman tesbiti	Nükleer ortam	
Sualtı	Taze su ve deniz suyu	Maksimum derinlik 400 m

7

MEKANİK

TİTREŞİMLERİN

İNSAN ÜZERİNE

ETKİSİ

7	MEKANİK TİTREŞİMLERİN İNSAN ÜZERİNE ETKİSİ	7.3
7.1	Giriş	7.3
7.2	İnsan Vücudunu Etkileyen Titreşimler	7.3
7.3	İnsan Vücudunun Çeşitli Frekanslardaki Titreşimlere Karşı Tepkisi	7.4
7.4	Frekans Ağırlığı	7.6
7.5	Ağırlık Eğrileri ve Referans Eksenler	7.7
7.6	İstatistik Analiz	7.8
7.7	İnsan Vücudunun Titreşime Maruz Kalmasının Değerlendirilmesi	7.9
7.8	İnsan Vücudunu Etkileyen Titreşimlerin Kontrolü	7.10

7 MEKANİK TİTREŞİMİN İNSAN ÜZERİNE ETKİSİ

7.1 Giriş

Titreşim teorisinde insan titreşimleri (Human Vibration) ayrı yer almaktadır. Bu başlık altında toplanan konular mekanik titreşimlerin insan vücuduna etkileri ile ilgilidir. İnsanlar günlük hayatlarında çeşitli titreşimlere maruz kalırlar. Ulaşım araçlarında maruz kaldığımız titreşimler buna örnek olarak gösterilebilir. Çalışan insanlar iş yerlerinde de titreşime maruz kalırlar. Bu titreşimlerin kaynakları fabrikalardaki çeşitli makineler veya kullanılan aletlerdir.

Ses ile ilgili bölümlerde bahsettiğimiz gibi aynı ses birisine müzik gibi gelebilir, başka birisine ise ıstırap verici olabilir. Aynı koşullar titreşimler için de geçerlidir. İnsanın günlük hayatında maruz kaldığı titreşimler bazen hoş, bazen ise çok rahatsız edici olabilir. Örneğin, dans ettiğimiz zaman çeşitli titreşim kaynağı kendimiz oluyoruz, fakat aynı zamanda bu olaydan biz zevk alırız. Tümsekli yolda yolculuk yaparken veya elektrikli el aletleri kullanırken maruz kalınan titreşimler rahatsız edicidir.

İnsan vücuduna etkileyen titreşimlerle ilgili bilimsel araştırmaların büyük bir kısmı titreşimlerin insan vücuduna etkisi konusu ile ilgilidir. Özellikle iş yerlerinde titreşimlere maruz kalan kişilerin sağlıklarına, insanların performansına vb. etkileri, önem taşımaktadır. İlk araştırmalar uçak pilotları, ağır çalışma araçları ve elektrikli el aletleri ile kullanan kişilerle ilgili ortamları içeriyordu. Günümüzde böyle araştırmalar tüm çalışma bölgelerini kapsamaktadır ve bunların amacı ilgili Standardları oluşturmaktır.

7.2 İnsan Vücudunu Etkileyen Titreşimler

İnsan vücudunu etkileyen titreşimler iki ayrı bölümde incelenebilir.

- Tüm vücudu etkileyen titreşimler,

- Elden yayılan titreşimler

Tüm vücudu etkileyen titreşimler genellikle yapı malzemelerinden kaynaklanan titreşimlerdir ve bunlar insanın tüm vücudunda yayılmaktadırlar. Ağır araç kullanırken sürücüyü etkileyen titreşimler veya fabrikada, zeminden gelen titreşimlerin insan vücudunda titreşimlere yol açması buna örnek olarak gösterilebilir.

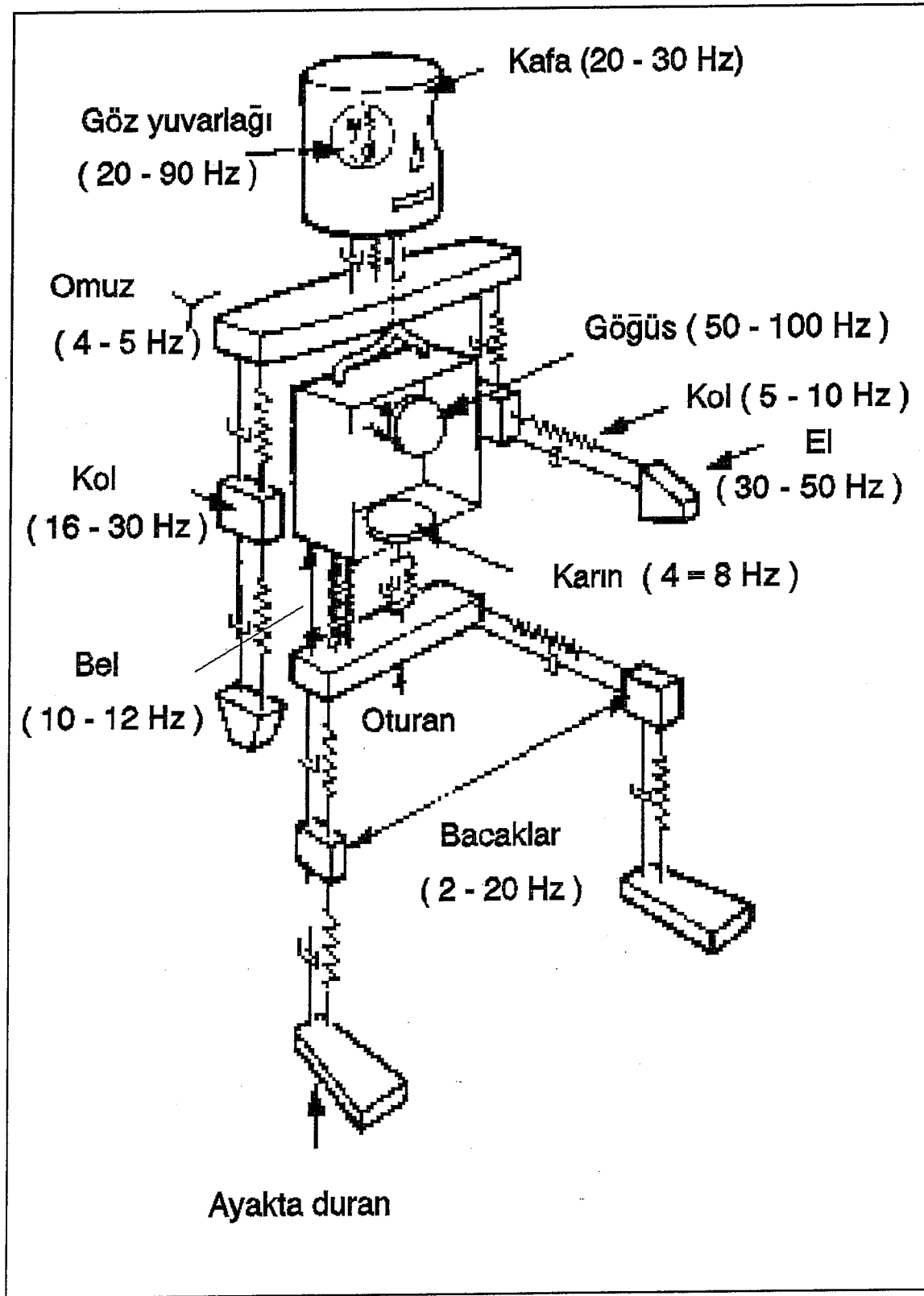
İkinci tip titreşimler ise insan vücuduna elden geçen titreşimlerdir. Bu tür titreşimlere, genelde elektrikli el aletleri (havalı betonkırıcı vb.) kullanan kişiler sık sık maruz kalmaktadırlar.

Uzun süre titreşimlere maruz kalmak, insanlarda kalıcı fiziksel bozukluklara yol açabilir, sinir sisteminde hasarlar oluşturabilir. Yıllar boyu, vücut titreşime maruz kalırsa, lümbago gibi ciddi hastalıklara uğrar, hatta maruz kalan kişide dolaşım ve/veya urolojik sisteminde bozukluklar oluşabilir. Yıllarca süren, elden yayılan titreşimlere maruz kalmaktan kaynaklanan hastalıklara örnek olarak Beyaz El (parmakların hissetme ve kontrol kaybı) hastalığı gösterilebilir. Ayrıca böyle durumlarda eklem ve adellelerde bir dizi bozukluklar ortaya çıkar.

Mekanik titreşimlerin insan vücuduna etkisi değerlendirilerken bir kaç faktör göz önüne alınmalıdır. Örneğin, insan vücudu farklı frekanslardaki titreşimlere karşı aynı derecede hassas değildir. Bundan başka titreşimin insan vücuduna zarar verici etkisi titreşimin seviyesine, titreşime maruz kalma süresine bağlıdır. Bu nedenlerle titreşim kontrolünde yukarıda adları geçen faktörler dikkate alınmalıdırlar.

7.3 İnsan Vücudunun Çeşitli Frekanslardaki Titreşimlere Karşı Tepkisi

Makinalardan yayılan mekanik titreşimler, makinaların hareketli parçalarından kaynaklanır. Herbir hareketli parça, kendi hareketine bağlı olan frekansa sahiptir. Bu



Şekil 7.1 İnsan vücudunun mekanik sistem benzeri

yüzden insan vücudunu etkileyen titreşimler genelde tek frekansta değil, belli bir frekans spektrumuna sahip olan titreşimlerdir. Ayrıca insan vücudu farklı frekanslardaki titreşimlere farklı tepki göstermektedir. Bu faktör insan vücudunu etkileyen titreşim seviyesini değerlendirirken göz önüne alınmalıdır.

İnsan vücudunun farklı frekanslardaki titreşimlere farklı tepki göstermesinin nedenlerini anlamak için, insan vücudunu bir mekanik sistem olarak ele alalım. Ancak böyle bir model kullanırken üç faktöre dikkat edilmelidir:

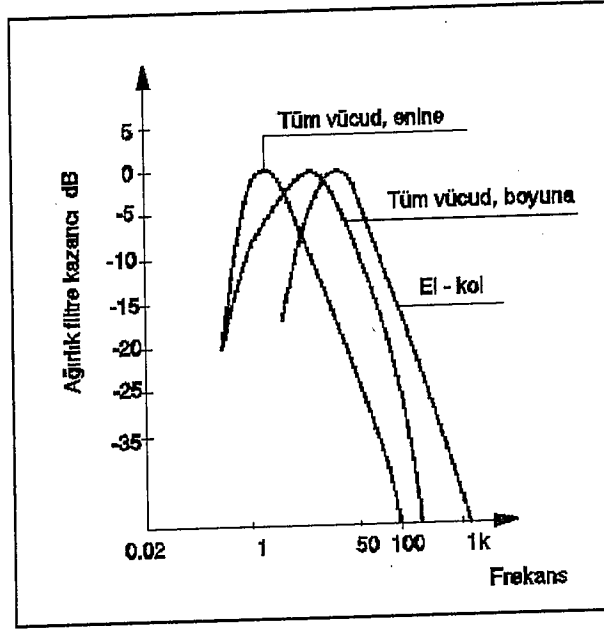
- İnsan vücudunun her kısmı belli frekans aralığındaki titreşimlere karşı daha duyarlıdır;
- İnsan vücudu simetrik değil;
- Çeşitli titreşimler farklı kişilerde farklı etki göstermektedir.

Şekil 7.1'de insan vücudu basitleştirilmiş mekanik sistem gibi gösterilmiştir [16]. Bu modelde insan vücudunun her kısmı basit bir sistem olarak tanımlanıp ve bunların hangi frekans aralığındaki titreşimlere daha duyarlı oldukları gösterilmiştir. İnsan vücudu simetrik olmadığından, mekanik titreşimlerin etkisi açısından uyarıcı titreşimin yönü çok önemlidir.

7.4 Frekans Ağırlığı

ISO, titreşimin etkisini değerlendirmek için üç ağırlık eğrisi tanımlamıştır.

Belli bir yöndeki titreşimin seviyesi ölçülürken, ölçümler, insan vücudunun duyarlı olduğu frekans bölgesinde yapılmalıdır. İnsan vücudunun daha duyarlı olduğu frekanslarda bu eğrilerde daha ağırlıklı gösterilmiştir. Böyle ağırlıklandırma, ölçülen titreşim seviyesi ile öznel hissiyet veya oluşan tesir arasında iyi bir uyum içindedir. Bildiğimiz gibi gürültü seviyesi değerlendirilirken aynı yöntem kullanılır; A-ağırlıklı filtre insan kulağının gürültüye karşı duyarlılığını simüle eder.



Şekil 7.2 İnsana etkiyen titreşim ölçümlerinde kullanılan frekans ağırlık eğrileri

Şekil 7.2'de adları geçen üç ağırlık eğrisi gösterilmektedir. Titreşimlerin farklı ortamlardaki etkilerini değerlendirmek için başka ağırlık eğrileri kullanılabilir. İnsan vücudunu etkileyen titreşimlerin seviyesi ölçülürken 0.1 Hz - 1500 Hz frekans aralığına önem verilmelidir. 1 Hz ile 80 Hz arasında oluşan titreşimler, tüm vücudun titreşimlere karşı tepkisi değerlendirilirken ilgi çeker, ayrıca 8 Hz ile 1000 Hz arasındaki titreşimler, elden geçen titreşimlere tepki değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdırlar.

7.5 Ağırlık Eğrileri ve Referans Eksenler

Tüm insan vücudunu etkileyen titreşimlerin seviyesi merkezi insan kalbinde olan ortogonal koordinat sisteminde ölçülmelidir. İnsan boyunca uzanan (kafadan - ayağa) yön z eksenini olarak adlandırılır. Bu eksen boyunca insan vücudu 4 Hz ile 8 Hz frekans aralığındaki titreşimlere karşı daha hassastır. x (önden - arkaya) ve y (yan - yana)

eksenler boyunca yayılan titreşimlere karşı insan vücudunun hassasiyetinde fark yoktur. Bu eksenler boyunca maksimum hassasiyet 1 Hz ile 2 Hz arasındaki titreşimlere karşıdır. 0.1 Hz - 0.63 Hz frekans bölgesindeki titreşimler, maruz kalan insanlarda rahatsızlık (genellikle mide bulantısı) oluşturan titreşimler olarak değerlendirilir. İnsanların titreşimlere karşı tepkileri ayrıca insanların fizyolojisine bağlıdır. Titreşim insan vücudunun pozisyonuna bağlı olduğuna dikkat çekelim.

Elden yayılan titreşimlerin seviyesini değerlendirirken titreşimin yönü hiç de önemli değildir. Diğer bir değişle, titreşim seviyesinin etkisi tüm istikametlerde aynıdır. Böyle durum için ağırlıklandırma eğrisinin tepesi (maksimum hassasiyet) ISO standardına göre 12 Hz - 16 Hz frekans aralığındadır.

7.6 İstatistik Analiz

Frekans ağırlıklandırılmış RMS ivme değeri a_{eq} insanın bölgesel maruz kalma titreşimleri ile ilgilidir. Genelde elden yayılan titreşimler için bu değer 2 - 50 m/s² iken, tüm vücudu etkileyen titreşimler için 0.1 - 40 m/s² aralığında olmaktadır. Fakat eşdeğer ivme değeri a_{eq} ve tepe ivme değeri, titreşimi tanımlayan en basit niceliklerdir. Titreşim seviyesinin ölçüm zamanı boyunca değişimini görmek için sonuçların istatistik analiz yapılması gerekir. Böyle analizin sonunda elde edilen olasılık dağılım eğrisi, titreşim seviyesinin belli iki değer L_1 (dB) ve $L_1 + \Delta L$ (dB) arasında bulunma zamanının toplam ölçüm zamanına göre yüzdesini gösterir.

Titreşim değerlendirmesi için başka bir yol da vardır. Bu yöntem istatistik analiz sonucunda elde edilen başka tür eğrilerin - toplam olasılık eğrileri - incelenmesidir. Bu eğrilerde titreşim seviyesinin toplam ölçüm zamanının yüzde kaçında belli seviye üzerinde olduğunu gösterir. Yukarıda bahsettiğimiz eğriler a_{eq} ile birlikte titreşim hakkında daha geniş bilgi verirler.

Titreşimin insan vücuduna etkisini belirlemek için dört önemli fiziksel faktör göz önüne alınmalıdır:

- Titreşimin eşdeğer ivme değeri a_{eq} ;
- Titreşimin frekansı;
- Uyarıcı titreşimin yönü;
- Titreşime maruz kalma süresi.

2631 ISO Standardı titreşimin insan vücuduna etkisini belirlemek için üç genel kriter ayırmıştır:

- İş verimliliğin korunması (yorgunluğa bağlı iş verimliliğinin azalması)
- İnsan sağlığının korunması (maruz kalma limiti)
- Rahatlığın korunması (azaltılmış konfor sınırı)

Yorgunluğa Bağlı İş Verimliliğinin Azalması Bu kriterin kullanım amacı insanın iş verimliliğini etkilemeyecek şekilde titreşimlere maruz kalma zaman limitlerini belirlemektir. Kriterde tanımlanmış zaman limitleri aşılmışsa (titreşim seviyesi $0,5 \text{ m/s}^2$ - maksimum maruz kalma süresi 4 saat), çalışan kişinin iş verimliliğinde azalmaya doğru değişiklikler olacaktır.

Maruz Kalma Limiti Bu kriter insan vücudunun titreşime maksimum maruz kalma zamanın limitinin değerlendirilmesi ile ilgilidir. Kriterde tanımlanmış zaman limitleri aşılmış ise (titreşim seviyesi $0,5 \text{ m/s}^2$ - maksimum maruz kalma süresi 11 saat), titreşime maruz kalan kişinin sağlığında önemli hasarlar oluşabilir.

Azaltılmış Konfor Sınırı Bu kriter uçak / gemi / tren ile seyahat eden kişilerin

komforunun değerlendirmesi için kullanılır. Kriterde tanımlanmış zaman limitleri aşılmışsa (titreşim seviyesi $0,5 \text{ m/s}^2$ - maksimum maruz kalma süresi 0,5 saat), insanların seyahat boyunca yemek yeme, okumak, yazmak gibi işlevleri zorlaşacaktır.

7.8 İnsan Vücudunu Etkileyen Titreşimlerin Kontrolü

Açık alanlarda veya orman gibi yerlerde kullanılan ağır araçlarda sürekli zeminden gelen titreşimler oluşacaktır. Eğer aracın titreşime karşı hiçbir yalıtımı yoksa, herbir tümseğe çarpmadan kaynaklanan titreşim araç sürücüsüne geçecektir. Bu yüzden böyle araçlarda belli bir yalıtım sistemi kullanılmalıdır. Örneğin, bu bir suspansiyon sistemi olabilir. Suspansiyon sistemi tümseklerle çarpmadan gelen titreşimlerin büyük bir çoğunluğunu yutar. Fakat böyle sistemlerin kendi rezonans frekansları olduğundan bu frekanslardaki titreşimlerin seviyesi artabilir.

Yapı malzemelerinden gelen titreşimlerin seviyesini azaltmak için çeşitli titreşim yutucu malzemeleri kullanılmalıdır. Titreşim seviyesinin yüksek olması bazen makinelerin kötü bağlantılarından kaynaklanabilir. Bu nedenle cihazların monte edilmesine ve bağlantıların sağlam olmasına dikkat edilmelidir.

Elektrikli el aletlerini kullanırken oluşan titreşimlerin kaynakları genellikle bu aletin hareketli parçaları olur. Böyle titreşimlerin seviyesini azaltmak için birkaç yöntem mevcuttur:

- Aletten gelen titreşimlerin aletin içinde yalıtımı;
- El ile alet arasında titreşimi azaltan araç kullanılması;
- Aletin uzaktan kumanda ile kullanılması.

Titreşimin insan vücuduna etkisini azaltmak için en son kullanılan yöntem günlük maruz kalma zamanının azaltmasıdır. Başka her türlü yöntemler denenmiş ise ve başarılı sonuçlar vermemişse, o zaman bu yöntem kullanılmalıdır.

8 KAYNAKLAR

1. S.KURRA "Ses Fiziği ve Gürültü Kavramı" (Çevre, Yapı ve Endüstri'de Akustik Sorunlar ve Gürültü Kontrolü), 1994, İTÜ, İstanbul
2. J.R.HASSAL, K.ZAVERİ "Acoustic Noise Measurements", 1988, Brüel & Kjaer, Denmark
3. A.S.FELDMAN, C.T.GRIMES "Hearing Conservation in Industry", 1985, Williams & Wilkins, London
4. MEASURING SOUND, 1984, Brüel & Kjaer, Denmark
5. SOUND LEVEL METERS, IEC 651, 1979, Geneve
6. INDUSTRIAL NOISE CONTROL & HEARING TESTING, 1988, Brüel & Kjaer, Denmark
7. M.ŞEREFHANOĞLU "Yapılarda Gürültü Sorunu ve Denetimi" (Çevre, Yapı ve Endüstri'de Akustik Sorunlar ve Gürültü Kontrolü), 1994, İTÜ, İstanbul
8. L.L.BERANEK "Noise & Vibration Control", 1983, Mc Graw Hill Books, USA
9. SOUND INTENSITY: Instrumentation & Applications, 1984, Brüel & Kjaer, Denmark
10. H.H.SABUNCU "Ses Fizyolojisi, Gürültü ile Oluşan İşitme Kayıpları ve Korunma Yöntemleri" (Çevre, Yapı ve Endüstri'de Akustik Sorunlar ve Gürültü Kontrolü), 1994, İTÜ, İstanbul
11. M.ÇALIŞKAN "Gürültü Denetimi. Temel Kavramlar ve Yasal Düzenlemeler", 1993, ODTÜ, Ankara
12. L.DOELLE "Environmental Acoustics", 1972, Mc Graw Hill Books, USA
13. NOISE CONTROL: Principles & Practice, 1982, Brüel & Kjaer, Denmark
14. J.T.BROCH "Mechanical Vibration & Shock Measurements", 1984, Brüel & Kjaer, Denmark
15. M.SERIDGE, T.R.LICHT "Piezoelectric Accelerometers & Vibration Preamplifier Handbook", 1987, Brüel & Kjaer, Denmark
16. HUMAN VIBRATION, 1989, Brüel & Kjaer, Denmark