

150231



T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK FREKANSLARDA MİKROFON
KALİBRASYONU İÇİN DIŞ KAVİTELİ DİYOT
LAZER BAZLI LAZER PİSTONFONUN
OLUŞTURULMASI

Eyüp BILGIÇ
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç.Dr.Engin BAŞARAN

GEBZE

2004

.....EYCP BİLGİS.....'ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 7.....16/09..... tarih ve 2004.....123..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından FİZİK..... Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRI

ÜYE : Doç. Dr. Engin BASARAN
(Tez Danışmanı)

ÜYE : Doç. Dr. Necati ECEVİT

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Kadın ESMER

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. S. Eren SAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. M. Hasan ASLAN

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06.07.2004 tarih ve 2004/28 sayılı kararı.

İmza / Mühür

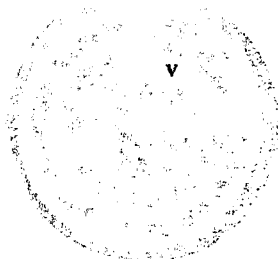
Prof. Dr. Adem KILIÇ
GYTE Mühendislik ve Fen Bil.
Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu deneysel çalışmada laboratuvar standardı niteliğinde (LS1P) mikrofonların 20-250 Hz aralığında dış kaviteli diyot lazerle (ECDL) mutlak kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir.

Kapalı bir hacim (bağlaşım) içerisinde hareket eden pistonun adyabatik yaklaşım altında gazı (hava) sıkıştırarak oluşturduğu ses basınç düzeyi; bağlaşımın ve pistonun fiziksel boyutları ve pistonun hareketi sonucu oluşan hacim değişikliğine bağlıdır. Çalışmalar sırasında görünür bölgede çalışan ve sıcaklık kontrolü olan bir ECDL sistemi kurulmuştur. Bağlaşımın ve pistonun boyutları 3 boyutlu koordinat ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Pistonun yer değiştirmesi ECDL ile ölçülmüştür. Elde edilen değerler kullanılarak bağlaşım içerisindeki ses basınç düzeyi mutlak olarak belirlenmiştir. Ses basıncı etkisinde bulunan mikrofonun ürettiği gerilim ise eşdeğer gerilim tekniği kullanılarak sayısal voltmetre ile ölçülmüştür. Gerilim ve ses basıncı değerleri kullanılarak mikrofonun hassasiyet değerleri belirlenmiştir.

Ortam basıncı, sıcaklık, nem gibi çevresel parametrelerin, mekanik bağlaşımın boyutlarının ve diğer fiziksel parametrelerin ölçümler üzerindeki etkileri incelenerek değerleri belirlenmiş ve mikrofon hassasiyeti üzerindeki düzeltmeleri yapılmıştır.



SUMMARY

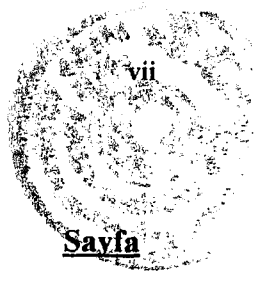
In this experimental study the absolute calibration of the laboratory standard (LS1P) microphones were carried out within 20 to 250 Hz frequency range by external cavity diode laser (ECDL).

The sound pressure level resulted from the compression of the gas (air) under adiabatic process by means of a moving piston in a closed cavity (mechanical coupler), depends on the physical dimensions of the mechanical coupler and piston and the volume variation caused by the piston movement. An ECDL system operating in visible range with temperature control unit was constructed in this work. The dimensions of the coupler and the piston were measured by 3D coordinate measuring machine. The displacement of the piston was measured by ECDL. Absolute value of the sound pressure level in the cavity was determined by calculated by using these values. The voltage produced by the microphone exposed to the sound pressure was measured by a digital voltmeter in accordance with insert voltage technique. The sensitivity values of the microphone have been determined by using the values of the measured voltage and the sound pressure level.

The effects of the environmental parameters such as ambient pressure, temperature and relative humidity and the dimensions of the mechanical coupler and other physical parameters on the measurement were investigated and their values were obtained and the microphone sensitivities were corrected taking care these corrections.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana yardımcı ve destek olan tez hocam sayın Doç. Dr. Engin Başaran'a, UME Akustik Standartları Laboratuvarı Sorumlusu Dr. Enver Sadıkoğlu'na ve laboratuvar arkadaşlarıma, dış kaviteli diyet lazerin kurulması sırasındaki katkılarından dolayı UME Zaman-Frekans Standartları ve Elektromanyetik Metroloji Laboratuvar Sorumlusu Dr. Ramiz Hamid'e ve laboratuvar elemanı Mustafa Çetintaş'a, diyet lazerlerin akım kaynağı ve sıcaklık kontrol cihazının yapılması aşamasındaki katkılarından dolayı UME Özel Ölçümler Laboratuvarı elemanı Savaş Acak'a, Bağlaşımların imalatı sırasında emeği geçen UME Mekanik Atölye elemanlarına ve bilhassa tez çalışmalarım süresince gösterdiği sabır ve anlayış için eşim Dilek'e çok teşekkür ederim. Tezimi hediye ettiğim ikizlerim Gizem ve Sinem'e de ayrıca teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. AKUSTİK TERMİNOLOJİSİ	3
2.1. Akustikte Kullanılan Genel Terimler ve Tanımları	4
2.2. Akustik Ölçümlerde Kullanılan Dönüştürücüler	5
2.2.1. Teknik Özelliklerine Göre Mikrofonlar	5
2.2.2. Kullanım Alanlarına Göre Mikrofonlar	6
2.2.3. Mekanik Yapılarına Göre Mikrofonlar	6
2.2.3.1. Elektret Mikrofonlar	6
2.2.3.2. Piezoelektrik Mikrofonlar	7
2.2.3.3. Hareketli-Bobin Elektrodinamik Mikrofonlar	7
2.2.3.4. Şerit (Ribbon) Mikrofonlar	8
2.2.3.5. Karbon Mikrofonlar	9
2.2.3.6. Kapasitif Mikrofonlar	9
3. MİKROFONLARIN KALİBRASYON YÖNTEMLERİ	13
3.1. Termofon	14
3.2. Rayleigh Diski	16
3.3. Elektrostatik Uyarma	18
3.4. Lazer Doppler Anemometrisi	20
3.5. Kapalı Hacim Karşılıklık Kalibrasyonu	22
3.6. Hesaplanabilir Klasik Pistonfon	25
3.6.1. Pistonfon için Basınç İfadesinin Türetilmesi	27
4. DENEY DÜZENEGİ ve SONUÇLARI	30
4.1. Ölçüm Düzeneginin Alt Bölümleri	32
4.1.1. Akustik Bölümü	32
4.1.2. Optik Bölümü	38

4.1.3. Mekanik Bölümü	44
4.1.4. Ölçüm ve Destek Cihazları	50
4.2. Ölçüm Düzeneklerinin Kurulması	55
4.2.1. Diyot Lazerin Dalga Boyunun Belirlenmesi	57
4.2.2. Dış Kaviteli Diyot Lazerde Optik Kısımın Ayarlanması	58
4.2.3. Akustik Bağlaşımların Hacimlerinin Hesaplanmaları	60
4.2.4. Basınç Hassasiyetini Etkileyen Parametreler	66
4.3. Ölçüm Sonuçları	70
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	85
EKA-1. Kapalı Bağlaşımlar İçerisinde Isı İletimi	86
EKA-2. Kılcal Boruların Akustik Empedansı	90
EKA-3. Fiziksel Parametreler	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

a	Disk in yarıçapı
A	Yüzey alanı
c	Işık hızı
C	Kapasitif mikrofonun kapasitesi
d	Kapasitif mikrofonda plakalar arası mesafe
d_p	Pistonun çapı
f	Frekans
f_a	Lazer pistonfonun alt frekans limiti
F	Kapasitif mikrofonun plakaları arasındaki kuvvet
i	Mikrofonun elektriksel terminallerinden geçen akım
I_{DC}	Folyeden geçen DC akım
I_{AC}	Folyeden geçen AC akım
I_0	Disk in hidrodinamik eylemsizlik momenti
I_1	Disk in eylemsizlik momenti
k	Dalga sayısı
m_0	Disk in hidrodinamik kütlesi
m_1	Disk in kütlesi
M_p	Kapasitif mikrofonların basınç hassasiyeti
p	Mikrofonun diyaframı üzerine düzgün olarak uygulanan ses basıncı
$p_{dinamik}$	Elektrostatik uyarıcı tarafından oluşturulan dinamik ses basıncı
p_{statik}	Elektrostatik uyarıcı tarafından oluşturulan statik ses basıncı
P_o	Ortamin statik basıncı
q	Mikrofonun akustik terminallerindeki (diyaframındaki) hacim hızı
Q	Kapasitif mikrofonda oluşan yük
r	Kılcal tüp yarıçapı
R	Isıtılmış nikel folyenin direnci
R_{alan}	Elektrostatik uyarıcı ve mikrofon diyaframlarının alanları oranı
R_f	Bir titreşim periyodu boyunca oluşan puls sayısı
t	Zaman



t_c	Basınç dengeleme zamanı
t_s	Ortam sıcaklığı
t_r	Referans sıcaklık
T	Salınım periyodu
u_{tepe}	Kapasitif mikrofona uygulanan AC gerilimin tepe değeri
u_{rms}	Kapasitif mikrofona uygulanan AC gerilimin etkin değeri
U	Kapasitif mikrofonda oluşan gerilim
v	Pistonun yer değiştirmesi sonucu süpürdüğü hacim
V_0	Akustik bağlaşımın nominal hacmi
$Z_{11}=Z_e$	Mikrofonun diyaframı bloke olduğunda, elektriksel empedansı
$Z_{22}=Z_a$	Elektrik terminallerinde gerilim yokken mikrofonun akustik empedansı
$Z_{12}=Z_{21}$	Mikrofonun geri ve ileri transfer empedansları
Z_{a12}	Sistemin akustik transfer empedansı
Z_{e12}	Sistemin elektriksel transfer empedansı
α_t	Bağlaşım içerisindeki havanın ısı iletkenliği
β	Frekans modülasyonlu sinyalin modülasyon indeksi
δx	Pistonun yer değiştirme genliği
δ_p	Mikrofonun normalize edilmiş statik basınç katsayısı
δ_t	Mikrofonun normalize edilmiş sıcaklık katsayısı
ΔL_{P_s}	Ortam basıncı düzeltmesi
ΔL_{P_M}	Mikrofon basınç düzeltme terimi
ΔL_{T_M}	Mikrofon basınç düzeltme terimi
ϵ	Dielektrik sabiti
η	Havanın viskozitesi
θ	Disk in dönme açısı
κ	Hava için spesifik ısılar oranı
λ	Kullanılan lazerin dalga boyu
v	Parçacık hızının genliği
π	Sabit sayı
ρ_0	Havanın yoğunluğu
$\rho_0 c$	Spesifik akustik empedans
ω	Açısal frekans

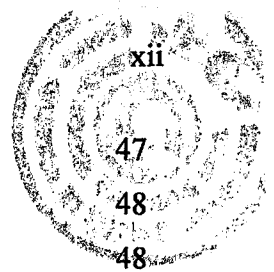


ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

2.1. Kapasitif mikrofonun yapısı	10
2.2. Kapasitif mikrofon ve ön yükselteci	10
3.1. Termofon ile kalibrasyon prensibi ve elektriksel ölçüm düzeneği	15
3.2. B&K 4002 tip duran dalga cihazı içerisinde Rayleigh diski	17
3.3. ½" boyutlarındaki bir mikrofon üzerinde bulunan elektrostatik uyarıcı	18
3.4. Mikrofon kalibrasyonu için Taylor tarafından kullanılan Lazer Doppler Anemometre düzeneğinin optik kısmı	21
3.5. Karşılıklı mikrofon kalibrasyonunda alıcı ve verici mikrofonun bir bağlaşım ile birbirine akustik olarak bağlanması	24
3.6. Ölçülen bağıl yer değıştirmenin mumlu kağıt üzerine kaydedilen ve 49.8 Hz frekansında çalışan klasik pistonfon	26
3.7. Aralarında yarım dalga boyu bulunan iki nokta arasında ısı yayılımının şematik gösterimi	28
4.1. B&K 4140 tip mikrofonun nominal boyutları	32
4.2 B&K 2645 tip ön yükselteç	33
4.3 B&K 2636 tip ölçüm ön yükselteci	34
4.4. B&K 2636 tip ön yükseltecin frekans tepkisi	35
4.5. B&K 2636 tip ön yükseltecin doğrusallık grafiğı	37
4.6. Michelson enterferometresinin şematik gösterimi	38
4.7. HL6501MG diyot lazerin boyutları ve elektriksel bağlantı pinlerinin açıklaması	40
4.8. HL6501MG diyot lazerin iç yapısı	41
4.9. Diyot lazerlerde dışarı salınan lazer demetinin profil yapısı	41
4.10 HL6501MG Diyot lazerde, parametrelerin birbiri ile bağımlılıkları kutu sıcaklığı-dalga boyu, kutu sıcaklığı-eşik akımı eşik akımı-optik çıkış gücü ve optik çıkış gücü-izleme akımı	42
4.11. HL6501MG tip diyot lazer kullanılarak oluşturulan dış kaviteli diyot lazer	43
4.12. Diyot lazerli geri besleme tip enterferometrenin şematik çizimi	44
4.13. Lazer pistonfonun silindirik kavitesini oluşturan farklı hacimlere sahip akustik bağlaşımlar	45



4.14. Lazer pistonfonun silindirik bağlaşımın montajı ve o-ring kullanımı	47
4.15. Lazer pistonfonun pistonu	48
4.16. Titreştiricinin monte edilmesinde kullanılan aparat	48
4.17. Lazer Pistonfonun mekanik parçalarının monte edilmiş şekli	49
4.18. Diyot lazer için UME’de yapılan akım kaynağı ve sıcaklık kontrol ünitesi	53
4.19a. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği şematik çizimi, lazer kaynağı olarak He-Ne lazeri kullanılmaktadır	55
4.19b. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği, lazer kaynağı olarak He-Ne lazeri kullanılmaktadır	55
4.20a. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği şematik çizimi, lazer kaynağı dış kaviteli diyot lazer (ECDL) kullanılmaktadır	56
4.20b. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği, lazer kaynağı olarak dış kaviteli diyot lazer (ECDL) kullanılmaktadır	56
4.20c. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği ve ölçme cihazları, lazer kaynağı olarak dış kaviteli diyot lazer (ECDL) kullanılmaktadır	57
4.21 22 °C sıcaklık ve 52 mA sürme akımında çalışan HL6501MG Diyot lazerin dalga boyunun değişimi	58
4.22. Foto diyot çıkış sinyalindeki elektriksel gürültüleri süzmek için kullanılan Notch filtresi ve Bode diyagramı	59
4.23. Akustik bağlaşımına ait görünüşler	60
4.24. Mikrofon ön hacmi ile onun önündeki boşluğun oluşturduğu V3 hacmi	61
4.25 Akustik bağlaşımın iç çapı ile h_c yüksekliği arasındaki ilişki	62
4.26. Akustik bağlaşımın içinde x eksenini boyunca V_1 hacmini yaklaşık olarak ifade eden , parabol	64
4.27. B&K 4160 tip mikrofonun düşük frekans sıcaklık katsayısına normalize edilmiş statik basınç katsayılarının f/f_0 frekans oranına göre değişimi	67
4.28. B&K 4160 tip mikrofonun rezonans frekansına normalize edilmiş sıcaklık katsayılarının frekansa göre değişimi	68
4.29. Mikrofonların dış kaviteli diyot lazer ile kalibrasyon düzeneğinin blok şeması.	70
4.30. Mikrofon kalibrasyonu sırasında gözlenen sinyallerin dalga şekilleri	71
4.31. B&K 4160 tip mikrofonun dış kaviteli diyot lazer ile gerçekleştiren kalibrasyonundan elde edilen basınç hassasiyetinin frekansa göre değişimi	78

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
2.1. Tip 4160 referans standart mikrofonun özellikleri	12
4.1. Ölçüm düzeneğini oluşturan cihaz ve elemanlar	31
4.2. 1" çapındaki B&K 4160 tip mikrofonla birlikte kullanılan B&K 2645 tip ön yükseltecin bazı teknik özellikleri	33
4.3 B&K 2636 tip ölçüm yükseltecinin frekans tepkisi ölçüm sonuçları	36
4.4. Ölçüm yükseltecinin doğrusallık ölçüm sonuçları	37
Tablo 4.5. Hitachi HL6501MG tip diyot lazerin nominal teknik özellikleri (Paket sıcaklığı 25 °C)	43
4.6 B&K 4810 tip titreşim uyarıcının bazı teknik özellikleri	50
4.7 B&K 2706 tip güç yükselticinin bazı teknik özellikleri	51
4.8. B&K 4160 tip mikrofonların rezonans frekanslarına normalize edilmiş basınç ve sıcaklık katsayıları	69
4.9. Ölçümlerin yapıldığı ortam şartlarında kılcal boru düzeltme teriminin frekansa bağlı değerleri	72
4.10. Ölçümlerin yapıldığı ortam şartlarında ısı iletimi düzeltme teriminin frekansa bağlı değerleri	75
4.11. Mikrofon basınç hassasiyetinin ortam şartlarına göre düzeltilmesi için kullanılan düzeltme terimleri	76
4.12. LS1P tip kapasitif mikrofonun kalibrasyonu sırasında ölçülen değerler ve basınç hassasiyetinin hesaplanması	77

1. GİRİŞ

Yaşadığımız çevrede sürekli olarak, değişik seviye ve frekans aralığında sese maruz kalmaktayız. Kulaklarımız, havada yayılan değişken ses basıncını algılayarak beyine iletir ve burada değerlendirilerek işitme olgusu sağlanır. İnsan kulağı 20 – 20000 Hz aralığındaki sesleri işitmektedir. Çalışma şartları altında duyulan; zaman ve frekans bileşenleri değişken olan sesler, her zaman istenilen konfor düzeyleri içerisinde olmayabilir. Bu nedenle ortamdaki sesin rahatsız edici, sağlığa zararlı veya normal düzeylerde olup olmadığı değerlendirilmelidir. Bu amaca yönelik yapılan ölçümlerin doğruluk düzeylerinin teyit ve tespiti için ses basınç birimi standardına ihtiyaç vardır.

Ses basınç birimi standardı Paskal, bir kapasitif mikrofonun basınç hassasiyeti üzerinden sağlanmaktadır. Mikrofonların hassasiyetlerinin belirlenmesi sırasında farklı kalibrasyon yöntemleri kullanılabilir. Ölçüm bilimi olan metroloji dünyasında yapılan bütün ölçümlerde bir belirsizlik değeri beyan edilir. Elde edilebilir en düşük belirsizliği sağlayan ve uygulanabilirliği uluslararası düzeyde kabul gören yöntem, standardın oluşturulmasında kullanılır. Ses basınç birimi standardının oluşturulmasında 63-20000 Hz frekans aralığı için kabul görmüş yöntem, Uluslar arası Elektroteknik Komisyonunun (IEC) hazırladığı karşılıklı kalibrasyon standardıdır [IEC Pub. 61094-2, 1992]. Düşük frekanslarda alternatif teknik ve ölçme cihazları araştırılmaktadır. Mikrofonların mutlak kalibrasyon yöntemlerinden diğer birisi de bir bağlaşım içerisinde hareket eden pistonun yer değiştirmesi ve bağlaşım boyutlarının ölçülmesi prensibine dayalı pistonfon kullanmaktır [Ballantine 1932, Lopashev et al 1974, Konkov et al, 1982]. Mekanik titreşim genliğinin ölçülmesinde optik yöntemler, son zamanlarda da lazer enterferometre kullanılmaktadır. Bu fikir ilk defa Ulusal Fizik Laboratuvarı, İngiltere’de (NPL/UK) gerçekleştirilen lazer pistonfonun [Rennie 1977, Barham 1993] çalışma prensibini oluşturmaktadır. NPL’in lazer pistonfonu, pistonfon içerisinde hareket eden pistonunun yer değiştirmesinin belirlenmesi dış pencereless enterferometre düzenindeki He-Ne lazerli Michelson enterferometresi ve girişim deseni sayma yöntemini kullanmaktadır.

Son on yıl içerisinde değişik dalga boylarında üretimleri yaygınlaşan ve içlerinde foto diyot ve diyot lazerlerin birlikte bulunduğu dahili tip enterferometre konfigürasyonları daha ilgi çekici hale gelmiş, mesafe, hız ve yer değiştirme ölçümleri gibi birçok farklı alanda kullanılmaya başlamıştır [Donati and Merlo 1998, Gagnon et al 1999, Kobayashi and Shudong 1988, Kikuta et al 1986, Donati et al 1996, Donati et al 1995, Ross et al 1996]. Ayrıca dahili tip enterferometrelerin ses basıncı ölçümlerinde kullanılması literatürde yerini almıştır [Gamidov et al 1998, Takahashi et al 1988]. Diyot lazerlerin kullanıldığı bu tip enterferometrelere geri beslemeli tip enterferometre denilmektedir.

Mikrofonların önceki yıllarda yapılan lazer pistonfon ile kalibrasyonlarında dış kaviteli geri besleme tip enterferometreler kullanılmamıştır. He-Ne lazerlerin kullanıldığı lazer pistonfonlarda enterferometre düzeneğinin, titreşim izolasyonu olan sabit bir masa üzerinde kurulmaları gerekmektedir. Sistemde kullanılan optik ayna elemanların en az %90'den fazla yansıtıcı özelliğe sahip olmaları gerekmektedir. Benzer amaçlı olarak geri besleme tip enterferometreler kullanıldığında, portatiflik, çok geri besleme optik sinyali, tekdüze yapıları ve kurulum maliyetleri açısından çok ilgi çekici olmaktadır.

Bu çalışmada laboratuvar standardı mikrofonların 20-250 Hz aralığında geri beslemeli tip enterferometre yapısındaki dış kaviteli diyot lazerle mutlak kalibrasyonları gerçekleştirilerek ECDL bazlı pistonfonun düşük frekans bölgesinde ses basıncı standardının oluşturulması için etkin bir araç olduğu ispatlanmıştır.

2. AKUSTİK TERMİNOLOJİSİ

Ses-bilim ve tekniği olarak tanımlanan akustik, ses dalgalarının oluşumu, iletimi ve etkilerinin yanı sıra işitme ile ilgili konuları inceleyen, uygulama olanaklarını araştıran bir bilimdir. Başlangıçta bu bilim, ses veren aletler ve müzik aletlerine karşı duyulan ilgiden doğmuştur. Bu kelimenin anlamı; işitme kavramı ile ilgilidir. Akustik biliminin kökeni, fizikçi Aristoteles ile milattan önceki devirlere değin uzanmaktadır. Sonraları, Phytagoras, Bacon, Galileo, Newton, Edison, Bell, Hertz, Sabiri ve diğerleri; ses titreşimlerini kuramsal ve deneysel yönlerden inceleyerek, fiziksel akustiğin temellerini kurmuş ve uygulama alanlarını genişletmişlerdir.

Yüzyılın son yarısında, akustik, ilgi duyulan yeni çevre bilimlerinden biri olmuş; tıp, biyoloji, fizyoloji, çeşitli mühendislik dalları, mimarlık ve şehircilik gibi bilim ve diğer disiplinler ile bütünleşerek bu çeşit bilimler arasında nitelik kazanmıştır. Özellikle ses enerjisinin elektrik enerjisine, elektrik enerjinin ses enerjisine dönüştürülmesi, sesin yazılması, okunması ve tekrarlanması, telefonda sonra radyonun, gramofonun, sesli filmin vs. bulunması, akustiğin optik, elektrik ve elektronik ile birleşerek büyük ilerlemeler yapacağını ve uygulama alanının çok genişleyeceğini ortaya çıkarmıştır. Uluslararası Akustik Komisyonu (ICA) akustik konularını şu başlıklar altında toplamaktadır:

- Konuşma iletişimi
- Fizyolojik ve psikolojik akustik
- Gürültü, etkileri ve kontrolü
- Şok ve vibrasyon
- Mimari akustik ve yapı akustiği
- Bioakustik
- Sualtı akustiği
- Ses üstü (Ultrasonik), kuantum akustiği ve sesin fiziksel etkileri
- Fiziksel akustik
- Aeroakustik (atmosfer akustiği)

- Müzik akustiğı ve müzik aletleri
- Ses iletimi (ses yayını ve yeniden üretimi)
- Akustik ölçümler ve araçlar (sinyal işleme)

2.1. Akustikte Kullanılan Genel Terimler ve Tanımları

Ses; bir kaynak tarafından, ortam basıncında dalgalanma oluşturan ve insanda işitme duyusunu uyaran fiziksel bir olaydır. İnsan kulağı için sesin duyulabilen frekans aralığı; 20-20000 Hz (bazı kaynaklara göre 16-16000 Hz)' tir. Akustik ölçümlerin temelini, **ses basıncı** ve **parçacık hızı** olarak adlandırılan iki fiziksel büyüklük oluşturur. **Ses şiddeti** ve **ses gücü** ise, bu iki büyüklükten türetilmiş olup, diğer akustik büyüklüklerle birlikte kullanılmaktadır.

Ses basıncı; belirli anda ortamın belirli noktasındaki basıncın, ortamın statik basıncından farkı olarak tanımlanır ve Pa (Pascal) birimi cinsinden ifade edilir.

Parçacık hızı; ses dalgasına bağlı olan, belirli uzaklıkta bulunan bir noktada ortamın sonsuz küçük parçasının anlık hızı olarak tanımlanır ve (m/s) cinsinden ifade edilir.

Ses şiddeti; belirli bir noktada birim alandan dik olarak birim zamanda geçen akustik enerji olarak tanımlanır ve (W/m^2) cinsinden ifade edilir.

Ses gücü; bir kaynağın birim zamanda ortama yaydığı toplam akustik enerji olarak tanımlanır ve W (Watt) cinsinden ifade edilir.

Akustik büyüklüklerin ölçümünde **desibel (dB)** ölçeğı kullanılır. Desibel skalasında referans değeri; ses basıncı için 1000 Hz'de insan kulağının ortalama duyma eşığı 20 μ Pa olup gürültü ölçeğinde bu 0 dB'e karşılık gelir. İnsan kulağının ağrı eşığı ses basıncı 200 Pa olup, gürültü ölçeğinde 140 dB'e denk gelir.

Buradan anlaşılacağı üzere akustik ölçümlerin temel ölçüm aracı mikrofondur. Bu yüzden ses basınç biriminin standardı da, düşük belirsizlikle kalibre edilmiş standart mikrofona üzerinden oluşturulur.

2.2. Akustik Ölçümlerde Kullanılan Dönüştürücüler

Akustik ölçümlerde kullanılan dönüştürücülerin kısaca tanımı yapılacak olursa; ses basıncını elektrik sinyaline çeviren bir düzen olduğu görülür. Gaz, sıvı ve katı ortamlarda yayılan sesleri ölçmek için çeşitli tipte dönüştürücüler mevcuttur. Mikrofonların çoğu ses basıncını, birkaç da doğrudan parçacık hızıyla orantılı olan basınç gradyenini ölçerler. Mikrofonlar, teknik yapıları ve kullanım alanlarına göre aşağıdaki gibi sıralanabilir [Crocker, 1998].

2.2.1. Teknik Özelliklerine Göre Mikrofonlar

Elektro-akustik Performansları: Mikrofonların tasarlandığı amaçlara uygun olarak kullanılabilirliklerinin bir göstergesidir. Hassasiyeti, yön bağımlılığı, frekans tepkisi, doğrusallık, sinyal-gürültü oranı ve dinamik bölge parametreleri bir mikrofonun performansını ortaya koyan ana parametrelerdir. Mikrofon hassasiyeti mikrofonun ürettiği elektrik sinyal genliğinin, diyaframı önünde bulunan ses basıncı (veya basınç gradyeni) genliğine oranı olarak tanımlanmaktadır. Yön bağımlılığı, mikrofonun diyaframına belirli bir yönlerden gelen seslere karşı verdiği tepkidir. Dinamik bölge ise mikrofonun ölçebileceği en küçük ve en büyük ses basıncı arasında kalan bölgedir. Bir mikrofonun doğrusallığı mikrofonun dinamik bölgesi içerisinde giriş parametresi olan ses basıncındaki değişime karşılık çıkışta ürettiği elektrik sinyalini değişim derecesi olarak adlandırılabilir. Frekans tepkisi, mikrofonun çıkışında ürettiği elektrik sinyalinin, mikrofon girişine uygulanan sabit genlikli ancak farklı frekanslı seslere nasıl bağlı olduğunu gösteren bir parametredir.

Elektrik karakteristiklerinden : mikrofonun çıkış empedansı, çıkış sinyalini yükseltmek için uygun metodu belirler.

Dış etkilere karşı duyarlılık : mikrofonun ortam sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızından bağımsız olarak çalışabilmesidir.

2.2.2. Kullanım Alanlarına Göre Mikrofonlar

İletişim Mikrofonları : Bireyler arasında konuşma yapabilmek için tasarlanmışlardır. Telefon mikrofonları ve işitme cihazlarının mikrofonları bu grup için örnek olarak verilebilir. Yüksek hassasiyet, sağlamlık, küçük boyut ve düşük fiyat esas olarak alınır.

Ses Kayıt ve Yayın Mikrofonları : Konuşma ve müziği yüksek kalitede tekrar elde edebilmek için tasarlanmışlardır. Bu tip mikrofonların belirli yön bağımlılıkları vardır.

Genel Amaçlı Mikrofonlar : Ses yükseltme sistemlerinde, anons sistemlerinde ve evlerde kullanılmak üzere tasarlanmışlardır.

Ölçüm Mikrofonları : Ses basıncının laboratuvar ve dış ortamlarda ölçülmesi için kullanılırlar. Kararlı olmaları gerekmektedir. Kullanım alanlarına bağlı olarak geniş dinamik ve frekans bölgeleri vardır.

2.2.3. Mekanik Yapılarına Göre Mikrofonlar

2.2.3.1. Elektret Mikrofonlar

Elektret mikrofonlar yapıları itibari ile kapasitif mikrofonlara benzemektedir. Aralarındaki asıl fark, elektret adı verilen ve üzerinde kalıcı yük bulunan polarizeli bir malzemenin mikrofonda kullanılması nedeni ile harici DC kaynağına ihtiyaç duyulmamasıdır. Elektret mikrofonlarda diyaframın bir tarafı ince polimer film tabakası ile kaplanır. Aynı boyutlardaki kapasitif mikrofonlarla benzer polarizasyona tutulduklarından, hassasiyetleri hemen hemen aynı; doğrusallık ve frekans tepkileri de birbirine oldukça yakındır. Farklı sinyal yükseltme yöntemi nedeni ile kapasitif mikrofonlara oranla geniş dinamik bölge ve düşük iç gürültüye sahiptirler. Ucuz olmaları nedeni ile telefonlarda ve teyp kaydedicilerde standart mikrofon olarak kullanılmaktadırlar.

2.2.3.2. Piezoelektrik Mikrofonlar

Piezoelektrik mikrofonlarda, temelde mekanik enerjinin elektrik enerjisine doğrusal dönüşümü prensibine dayanan piezoelektrik malzeme kullanılır. Geleneksel piezoelektrik malzemeler, ses basıncına maruz bırakıldıklarında boyutsal gerinmelerine orantılı olarak gerilim üreten kristal ve seramiklerdir. Bu tip elemanlar mikrofonlarda genelde iki şekilde kullanılırlar:

- diyaframın hareketinin bir mekanizma ile piezoelektrik elemana iletilmesi
- diyaframın kendisinin piezoelektrik elemandan yapılmasıdır.

Elektret mikrofonlarda olduğu gibi harici güç kaynağı gerektirmemesi piezoelektrik mikrofonların avantajlarından birisidir. Uygun yapılı bir piezoelektrik mikrofon 20 – 10000 Hz aralığında çalışabilir. Elektrik empedansının kontrol edilmesiyle mikrofon ile yükselteç arasındaki kablo uzunluğu arttırılabilir.

2.2.3.3. Hareketli-Bobin Elektrodinamik Mikrofonlar

Genellikle dinamik mikrofon olarak da adlandırılan hareketli bobin elektrodinamik mikrofonları, elektrodinamik hoparlörlerin tam bir benzeridir. Manyetik alan içerisinde doğrusal dönüşüm (transduction) mekanizması hareketli bobin elektrodinamik mikrofonların temel çalışma prensibini oluşturur. Bir bobinin sabit olarak monte edildiği diyafram, ses basıncının etkisinde hareket eder. Sabit bir mıknatısın ürettiği manyetik alan içerisinde yer alan bobin, diyaframın hareketiyle orantılı bir gerilim üretir.

Dinamik mikrofonların düşük frekanslara cevap verme yeteneğini, mikrofon içerisindeki ve dışarısındaki hava eşitleme deliklerinin rezonansı kısıtlar ve bu rezonans 40-100 Hz arasında yer alır. Üst frekans limiti ise diyafram temel rezonans frekansındadır. Rezonansların etkisini azaltmak için sisteme aktif ve pasif

sönümleyiciler eklenebildiğinden mikrofon tepkisi düzdür ve rezonansın üzerindeki frekanslarda, frekansın artışına karşın azalan çıkış verir.

Kapasitif ve elektret mikrofonlarda olduğu gibi dinamik mikrofonlar, dalga boyunun diyafram boyutları ile kıyaslanabilir olduğu frekanslara kadar yönsüz (omnidirectional) tepki verir. Düşük empedanslı olduklarından uzun kablo gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Sıcaklık ve neme karşı oldukça iyi dayanıklıdırlar.

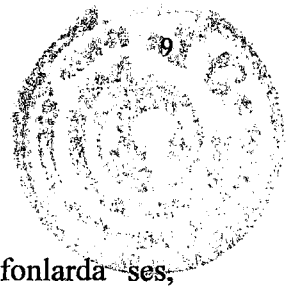
2.2.3.4. Şerit (Ribbon) Mikrofonlar

Elektrodinamik şerit mikrofonlar, dinamik mikrofonlara benzemekte ancak diyafram ve buna bağlı bobin, manyetik devre arasında asılı duran dalgalı bir şerit ile yer değiştirir. Bu tip mikrofonda şerit, ön ve arka tarafından farklı değerli ses basıncına maruz bırakılır. Farklı ses basıncına maruz kalan şerit, eğilerek tepki verir. Manyetik alan içerisindeki bu hareket sonucu ses basıncı ile orantılı gerilim üretilir. Şerit mikrofonlar uzaysal basınç farklılıklarına tepki vermesi amacıyla üretildiğinden gradyen mikrofonu olarak sınıflandırılırlar. Basınç gradyen veya hız gradyen mikrofonların üç avantajı vardır. Bunlar:

- Yönü nedeni ile, yayınlık (diffuse) alan ve geri plan gürültülerine fark gösterme eğilimindedirler. Bu ise ses kaynağının, yönsüz mikrofonlar için konulabilen yerlerden daha uzağa konulmalarına imkan verir.
- Ön ve arka ses basıncına tepkileri aynı olduğundan bilhassa birbirlerine bakan iki kişinin konuşmalarını kaydetmek için oldukça uygundur.
- $\pm 90^\circ$ açılarındaki tepkilerindeki sıfır noktaları nedeni ile lokal gürültü kaynaklarını elimine etmek mümkündür.

Polimer film üzerine alüminyum kaplı şeridin ortaya çıkması şerit mikrofonların son gelişmeleridir. Böylece mikrofonlar 15-20 kHz'e kadar kullanılabilir. Genel olarak dinamik mikrofonlar kadar dayanıklı olmadıkları için yüksek genlikli basınç darbeleri mikrofonda kalıcı hasar verebilmektedir.

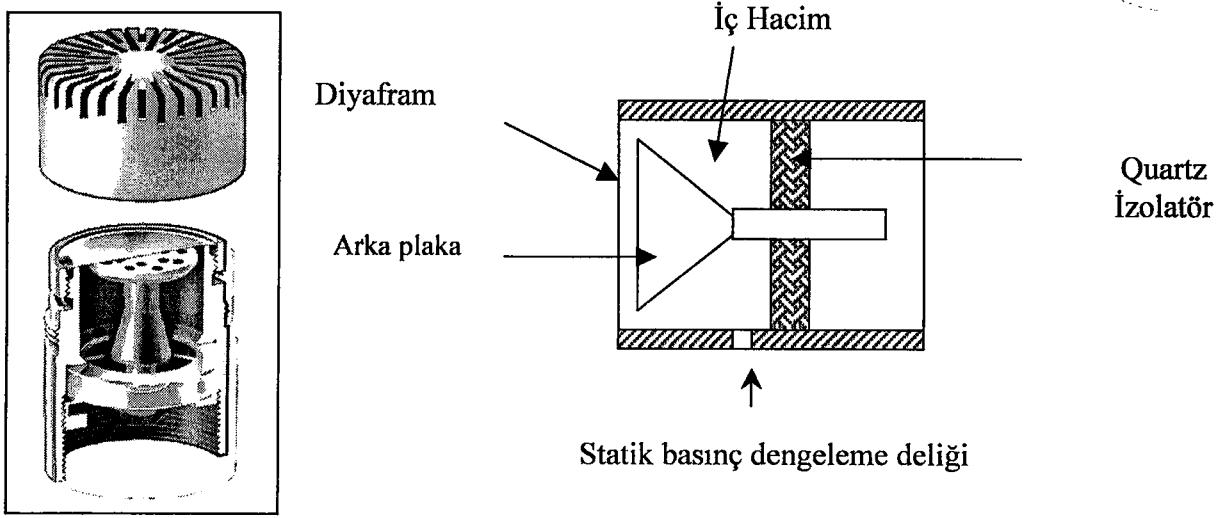
2.2.3.5. Karbon Mikrofonlar



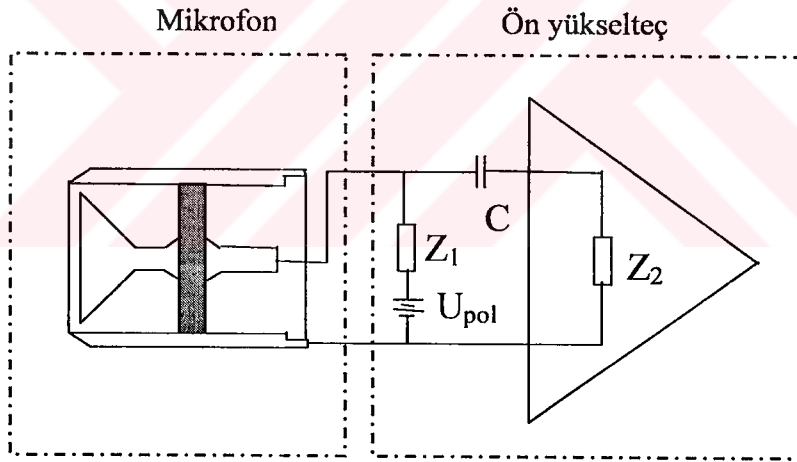
Karbon mikrofonlar direnç tipi mikrofonlardır. Karbon mikrofonlarda ses, karbon taneciklerine kuvvet uygulayan bir diyafram üzerine gelir. Karbon tanecikleri ile dolu hacmin direnci, uygulanan kuvvetin bir fonksiyonudur. Yaklaşık olarak 70 – 2000 Hz aralığında düz frekans tepkisine sahiptirler. Karbon mikrofonlar zayıf doğrusallık ve dinamik bölgeye sahip olmalarına rağmen oldukça sağlamdırlar. Bu nedenle çoğunlukla yüksek kalitenin gerekmediği konuşma iletişimi için kullanılmaktaydılar. Son zamanlarda karbon mikrofonlar yerlerini elektret mikrofonlara bırakmıştır.

2.2.3.6. Kapasitif Mikrofonlar

Gerilmiş metalik bir diyafram ve arka plakadan oluşan yapıyla, kapasitif mikrofonlar ses basınç biriminin standardının oluşturulması ve ses ölçümleri amacıyla kullanılırlar. Bu özellikleri nedeniyle referans standart niteliğini taşırlar. Yapıları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de verilmiştir [B&K Master Catalogue CD, 1999]. Kapasitif mikrofonların çalışabilmeleri için yapılarında, değeri zamanla kararlı değişmeyen elektrik yükü bulunmalıdır. İhtiyaç duyulan bu yük, harici bir DC gerilim kaynağından elde edilir. DC gerilimin değeri, yapılan çalışmalar sonucu mikrofon kararlılığı ve geniş frekans bölgesi nedeni ile 200 VDC olarak kabul görmüştür. Kapasitif mikrofonlarda oluşan yükün zaman içerisinde değişmeden kalmasını sağlamak için diyafram ile arka plaka arasında çok yüksek izolasyon direnç değerine sahip (yaklaşık $10^{15} \Omega$ mertebelerinde) kuartz kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Kapasitif mikrofonun yapısı



Şekil 2.2. Kapasitif mikrofon ve ön yükselteci

A yüzey alanına sahip ve aralarındaki mesafe d olan iki metalin oluşturduğu kondansatörün kapasitesi;

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2-1)$$

ifadesi ile verilir. Burada ϵ , levhalar arasındaki ortamın (havanın) dielektrik sabitidir. Kapasite ile yük arasında;

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2-2)$$

ilişkisi vardır. Ses basıncının etkisiyle mikrofonun diyaframı titreşir. Diyafram ile arka plaka arasındaki mesafe buna bağlı olarak ta mikrofonun kapasitansı değişir. Yük sabit iken kapasitanstaki değişimin gerilime etkisi;

$$\Delta U = Q \frac{\Delta C}{C^2} \quad (2-3)$$

ile verilir. Mikrofonun diyaframı topraklandığından, gerilim arka plakadan alınmaktadır. Mikrofonların empedansları çok büyük, üretilen gerilimin değeri küçük olduğu için bir ön yükselteci gereksinim duyulur. 200 VDC polarizasyon gerilimi bu ön yükselteç aracılığıyla mikrofonu uygulanır.

Kapasitansın değişimi, mikrofonun elektriksel terminallerindeki değişken (AC) gerilim olarak algılanır. Aynı zamanda mikrofonun terminallerine AC gerilim uygulandığında, mikrofonun diyafram hareket eder ve mikrofon bir ses kaynağı gibi çalışır. Bu özellikleri nedeni ile kapasitif mikrofonlar hem alıcı hem de verici olarak kullanılabilirler. Referans standart özelliği taşıyan Brüel&Kjaer (B&K) 4160 tip kapasitif mikrofonun tipik teknik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir [Instruction Manual, Condenser Microphones, Revision May 1991].

Metrolojik amaçlı ölçümlerde referans standardı kapasitif mikrofonlar, International Electrotechnique Commission IEC 61094-1 standardına göre sınıflandırılmıştır. 1" çapındaki basınç tipi mikrofonlar LS1P, 1/2" çapındaki mikrofonlar ise LS2P olarak sınıflandırılır. 1/2" çapındaki mikrofonlar kendi aralarında diyafram çapına göre LS2aP (9.3 mm) ve LS2bP (9.8 mm) olarak iki

gruba ayrılırlar. Hassas kalibrasyonlar amacıyla kullanılan çalışma standardı mikrofonlar, IEC 61094-4 standardına göre WS grubunu oluştururlar. Bu mikrofonlar da çaplarına göre WS1P (1"), WS2P (1/2") ve WS3P(1/4") olarak sınıflandırılır. IEC önerilerine uygun olarak tüm metroloji merkezlerince birincil standart olarak, B&K tarafından üretilen 1" çapındaki 4160 tip ve 1/2" çapında 4180 tip mikrofonlar kullanılmaktadır. Bunun nedenleri olarak bu tür mikrofonların oldukça yüksek hassasiyetleri, kararlılıkları ve ortam şartlarındaki değişimlere dayanıklı oluşları gösterilebilir.

Tablo 2.1. Tip 4160 referans standart mikrofonun özellikleri

Parametre	Sayısal Değeri
Basınç hassasiyeti	-26.5 dB ref. 1V/Pa 47 mV/Pa
Frekans tepkisi	± 1 dB 8000 Hz'e kadar
Alt frekans limiti	1-2 Hz
Diyafram rezonans frekansı	8.5 kHz
Dinamik bölge üst limiti	146 dB
Mikrofonun kapasitansı	55 pF, 250 Hz'de 200 V (DC)
Eşdeğer hacim	$148 \text{ mm}^3 \pm 30 \text{ mm}^3$
Mikrofon ön hacmi	530 mm^3
Ortam basıncına göre hassasiyet değişimi	-0.0016 dB/mbar (250 Hz'te 1013 mbar)
Ortam sıcaklığına göre hassasiyet değişimi	0.0035 dB/°C (250 Hz'te -10 ile +55 °C arasında)
Bağıl neme göre hassasiyet değişimi	0.0025 dB/ %100 RH (250 Hz'te 23°C)
Uzun dönem kararlılığı (hassasiyet değişimi)	1000 yılda 1 dB'den az

3. MİKROFONLARIN KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

Akustik alanındaki araştırmalar, akustik sinyalin elektrik sinyaline veya elektrik sinyallerin akustik sinyallerine dönüşümünü içermektedir. Bu dönüşüm mikrofon veya hoparlörler aracılığı ile olmaktadır. İlk kez Rayleigh tarafından yazılan Ses Teorisi'nde (Theory of Sound, 1877) terminoloji olarak mikrofon veya hoparlörden bahsedilmemektedir. O dönemlerde akustik ölçümler, optik yöntemler kullanılarak, havanın kırılma indisinin veya diyafram hareketinin veya bir duvara uygulanan statik basıncın ölçülmesine dayanıyordu. Mikrofon, sesi elektrik devrelere aktardığından verici, hoparlör ise elektrik sinyallerine dönüştürdüğü için alıcı olarak adlandırıldı. Günümüzde mikrofon alıcı olarak kullanılmaktadır.

1917'de Wente sesin kapasitif mikrofonla ölçülmesini ilk kez açıklayan yayınında akustikteki ilk terminolojiyi kullandı[Wente E. C., 1917]. Kapasitif mikrofon, birisi sabit diğeri ses basıncı etkisinde hareket eden paralel levhali kondansatörlerdir. Kondansatör büyük direnç değerine sahip bir direnç üzerinden yüklenir. Hareketli levhanın (diyaframın) yer değiştirmesi uygulanan basınçla orantılıdır. Yüksek değerli direnç, yüklerin boşalmasını engellediğinden kondansatör üzerindeki gerilim de ses basıncı ile orantılıdır. Wente'nin mikrofonunun hassasiyeti statik kuvvet altında diyaframın esnemesi ve kapasitesinin ölçülmesi ile hesaplanmıştır..

Günümüzün modern mikrofonlarında diyafram yaklaşık 5 μm kalınlığında ve delikli arka plaka (backplate) 25 μm mesafede gerilmiş olarak tutulur. Arka plaka; levha, sıkışan havanın, diyaframın hareketini sönümlemesini engellemek için delikli yapılmıştır. Basınç dengeleme deliği, mikrofonun diyaframın arkasında bulunan statik basıncı dış hava basıncına eşitlemek için kullanılır. Ayrıca, bu deliğin zaman sabiti mikrofonun düşük frekans performansını belirlemektedir. Mikrofon üreticileri değişik mikrofon tepkileri elde etmek için diyafram mesafesi, diyafram kütlesi ve arka plaka üzerindeki delik sayısı gibi parametreleri değiştirmektedirler.

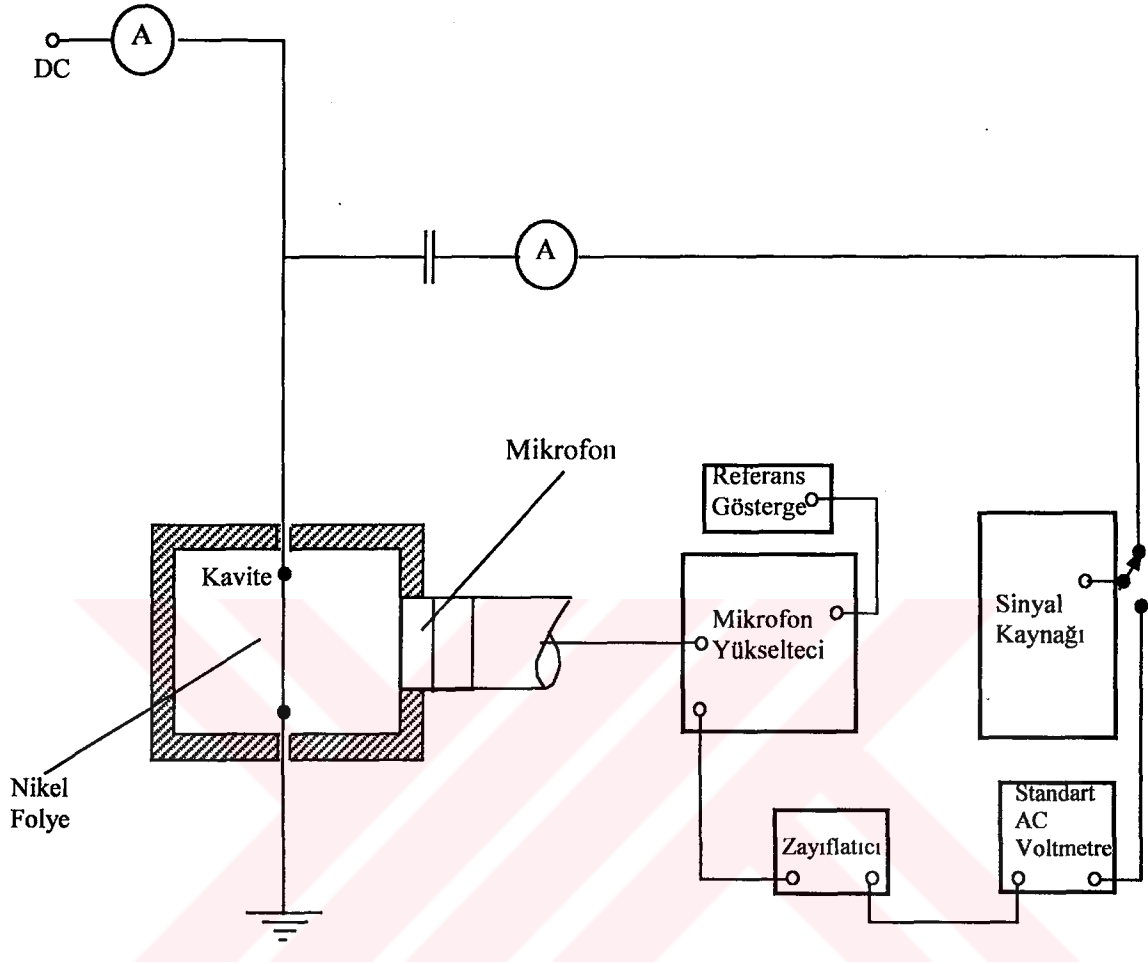
Günümüze kadar akustik ölçümlerde kullanılan mikrofonların hassasiyetlerini belirlemek için farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir :

- Termofon
- Rayleigh Diski
- Elektrostatik Uyarma
- Lazer Doppler Anemometrisi
- Karşılıklık kalibrasyonu
- Klasik Pistonfon

3.1. Termofon

Wente'nin mikrofon ve pistonfonu tanımladığı dönemde [Arnold ve Crandall, 1917] hassas ses kaynağı olarak farklı bir cihaz geliştirdiler. Bu cihazın çalışma prensibi, bir iletkenin değişken akım (AC) geçirildiğinde ısı üretmesidir. Eğer iletken yeterince ince ise çok küçük ısı kapasitesine sahip olacak ve böylece sıcaklığı, değişken akımı izleyecektir. İletkeni çevreleyen hava ısınacak ve havanın periyodik genleşmesi ses dalgası olacaktır. Termofonun şematik resmi Şekil 3.1'de verilmiştir [Brüel P.V.-II ,1965].

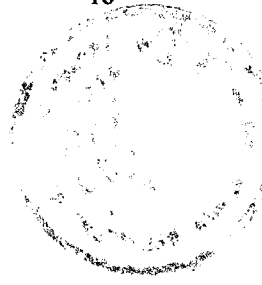
Arnold ve Crandall bu ses kaynağı için, kapalı bağlaşım içerisinde üretilen basınç için bir teori geliştirdiler. Bu teoride pistonfon için yapılan “kapalı bağlaşım içerisindeki her yerde basıncın eşit olması” yaklaşımının aynısı yapıldığından bu cihazın da çalışma bölgesi düşük frekanslara kısıtlanmıştı. Ancak bağlaşımın tamamen izole edilebilir olması pistonfona göre bu cihazın bir avantajıdır. Bağlaşım içerisindeki havadan başka gaz örneğin hidrojen veya helyum kullanılması ile frekans bölgesi genişleyebilmektedir.



Şekil 3.1. Termofon ile kalibrasyon prensibi ve elektriksel ölçüm düzeneği
[Brüel P.V.-II, 1965].

Termofon için verilen en detaylı teori Riety 1955 tarafından verilmiştir [Brüel P.V.-II ,1965]. Termofonda iletken tel olarak nikel folyo, iletken üzerinden geçirilen AC gerilim yerine DC akım üzerine bindirilmiş (superimposed) AC akımı kullanılmıştır. Hacim içerisindeki basınç ifadesi şöyledir:

$$p = \frac{2RI_{DC}I_{AC}(\kappa - 1)10^7}{\omega V_0 \left[\left(1 + \frac{X\omega}{4\alpha_t\alpha} \right)^2 + \left(\frac{X\omega}{4\alpha_t\alpha} \right)^2 \right]^{1/2}}, \text{ dyne /cm}^2 \quad (3-1)$$



Burada;

R : Isıtılmış nikel folyenin direnci, =0.1304 Ohm

I_{DC} : Folyeden geçen DC akım, 1A,

I_{AC} : Folyeden geçen AC akım, 0.1 ve 0.05 A,

κ : Hava için spesifik ısılar oranı, hava için 1.402

$\varphi=2\pi f$: Açısal frekans, $f = 50$ ve 250 Hz (c/s),

V_0 : Bağlaşım hacmi, 17.75 cm^3 ,

X : Folyenin ısı kapasitesi, $1.4 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2$

α_t : bağlaşım içerisindeki havanın ısı iletkenliği, $41 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{^{\circ}\text{C} + 273}{273}}; \text{ cal/cm}^2$,

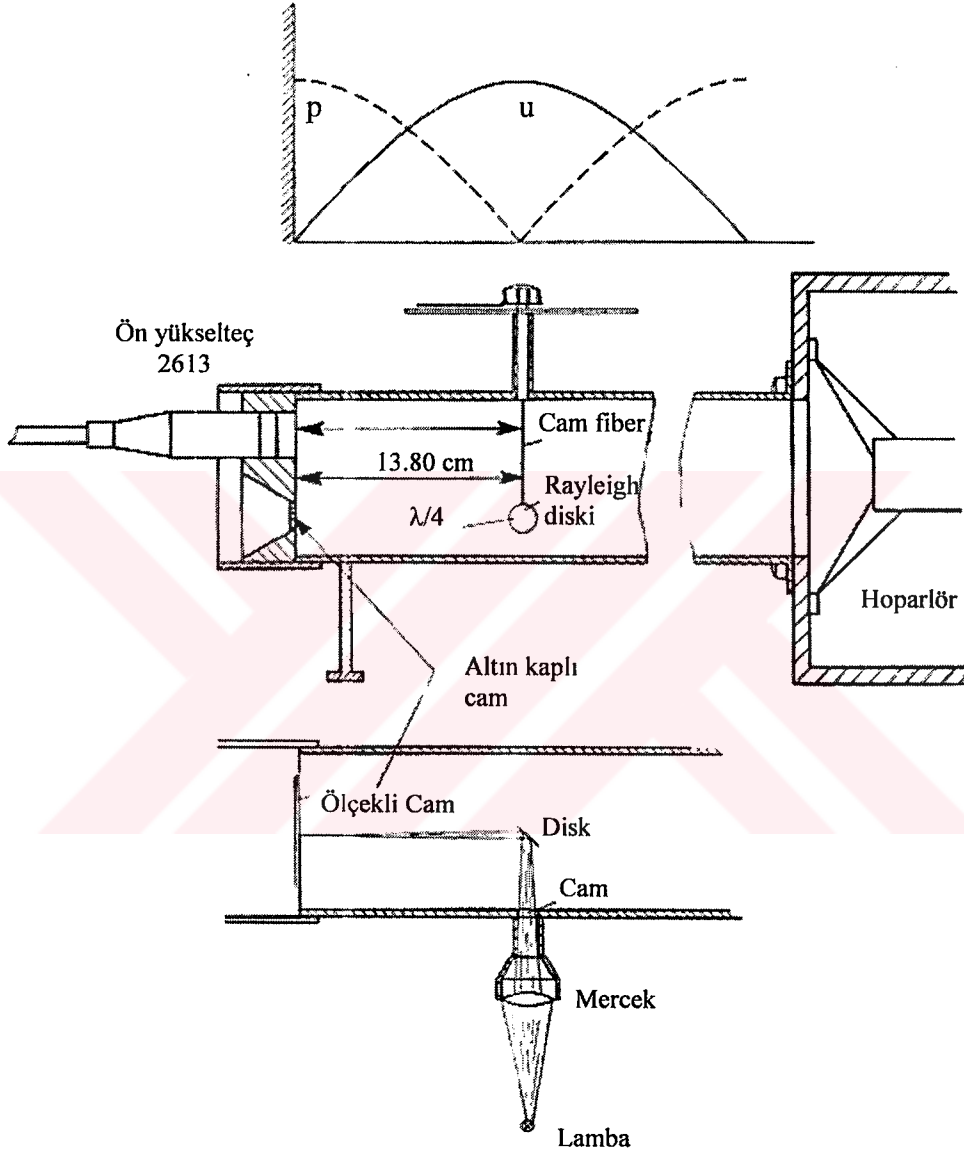
α : $1.53 \sqrt{f} \left(\frac{273}{^{\circ}\text{C} + 273} \right)^{3/4}; \text{ cm}^{-1}$

3.2. Rayleigh Diski

Rayleigh diski; ses hızının, bir ses demetinin belli bir açıda konumlandırılmış ince bir disk üzerinde oluşturduğu tork üzerinden hesaplandığı akustik radyometre olarak tanımlanır. Rayleigh diski, ince bir fiber ile asılan hafif bir dairesel diskir. Böyle bir disk hava akışının olduğu bir alana konulursa, bağlandığı fiberin geri çağırıcı kuvvetine karşı, kendi düzlemi, hava akış doğrultusuna dik olacak şekilde dönme eğilimi gösterir. Diske değişken hava akışı uygulandığında kararlı bir sapma sağlanır. Bir tarafı mikrofon diyaframı ile sonlandırılmış duran dalga tüpünün içerisinde üretilen sesin $1/4$ dalgaboyu mesafesine Rayleigh diski asıldığında bu noktada parçacık hızı maksimum, basınç sıfır olacaktır. Mikrofon diyaframına ise maksimum değerde ses basıncı etkiyecektir. Mikrofon kalibrasyonları için önceki yıllarda kullanılmış ve içerisinde Rayleigh diski olan tipik bir cihazın yapısı Şekil 3.2’te verilmiştir.

Diskin AC hava akışı etkisinde dönme açısından faydalanılarak duran dalga tüpü içerisindeki parçacık hızı ve buna bağlı olarak ses basıncı hesaplanabilir. 1960’lı yılların başlarında bu yöntem NPL’ de 10 kHz ’e kadar mikrofonların mutlak

kalibrasyonları için kullanılmıştır [Jarvis D.R., 1989]. Ses basıncı E.V. King tarafından verilen formül ile dyne/cm² birimi cinsinden belirlenebilir [Brüel P.V.-I, 1965]:



Şekil 3.2. B&K 4002 tip duran dalga cihazı içerisinde Rayleigh disk, [Brüel P.V.-I, 1965].

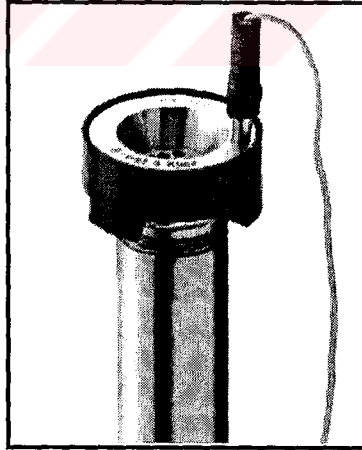
$$p^2 = \frac{8\pi^2 (\rho_0 c)^2}{T^2} \frac{(I_1 + I_0)(m_1 + m_0)}{m_1 m_0} \theta, \text{ dyne}^2 / \text{cm}^4 \quad (3-2)$$

Burada;

- $\rho_0 c$: Spesifik akustik empedans; = 41.50 Rayl,
 ρ_0 : Havanın yoğunluğu; = 0.001195 g/cm³,
 m_1 : Diskin kütlesi; g,
 m_0 : Diskin hidrodinamik kütlesi; = $\frac{8}{3} \rho_0 a^3$
 a : Diskin yarıçapı; cm,
 I_1 : Diskin eylemsizlik momenti; = $\frac{1}{4} m_1 a^2$ g/cm²,
 I_0 : Diskin hidrodinamik eylemsizlik momenti; = $\frac{2}{15} m_0 a^2$ g/cm²,
 T : Salınım periyodu; s
 θ : Diskin dönme açısı; rad.

3.3. Elektrostatik Uyarma

Elektrostatik uyarıcı, mikrofon diyaframı ile birlikte bir kondansatör oluşturan, elektriki olarak iletken ve delikli düz bir metal plakadır. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi diyafram üzerinde genellikle 0.4-0.8 mm arasındaki bilinen küçük bir mesafede tutulur.



Şekil 3.3. 1/2" boyutlarındaki bir mikrofon üzerinde bulunan elektrostatik uyarıcı [B&K Master Catalogue CD, 1999]

AC ve DC elektrik sinyali birlikte uygulandığında elektrostatik uyarıcı ve mikrofon diyaframı arasında bilinen bir ses basıncını simüle eden bir kuvvet

oluşturulur. Elektrostatik uyarıcı tarafından üretilen eşdeğer ses basıncı kondansatöre depo edilen enerji göz önüne alınarak elektrik veya mekanik terimler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir :

$$\frac{U^2 \cdot C}{2} = F \cdot d \quad (3-3)$$

Burada;

- U : plakalar arasındaki gerilim, Volt
 C : kapasitans, Farad
 F : plakalar arasındaki kuvvet, Newton
 d : plakalar arası mesafe, m

Eşitlik 3.3 yeniden düzenlenirse elektrostatik ses basıncı için aşağıdaki ifade bulunur.

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\epsilon \cdot U^2}{2 \cdot d^2} \quad (3-4)$$

Elektrostatik uyarıcıya DC ve AC gerilim birlikte uygulanırsa eşdeğer elektrostatik ses basıncı için

$$p = \frac{\epsilon}{2d^2} (U_o + u_{tepe} \sin(\omega t))^2$$

veya

$$p = \frac{\epsilon}{2d^2} (U_o^2 + 2U_o u_{tepe} \sin(\omega t) + u_{tepe}^2 \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}) \quad (3-5)$$

ifadesi elde edilir. Burada,

- ϵ : plakalar arasında bulunan gazın dielektrik sabiti (hava için 8.85×10^{-12} F/m),
 U_o : uygulanan DC gerilim (genellikle 800 V),
 u_{tepe} : AC gerilimin genliği ($u_{rms} = u_{tepe} / \sqrt{2}$, 5 Volt mertebelerinde),
 ω : açısal frekans, ($= 2\pi f$)
 f : frekans,
 t : zaman

Eşitlik 3.5 incelendiğinde, sabit ve trigonometrik terimlerden oluştuğu görülür. Mikrofonun frekans karakteristiği elde edilmek istendiğinde trigonometrik terim kullanılır. Elektrostatik ses basıncı ifadesi statik ve dinamik terimler cinsinden ifadesi şöyle verilir:

$$P_{\text{statik}} = \frac{\epsilon}{2d^2} (U_o^2 + u_{\text{rms}}^2)$$

ve

$$P_{\text{dinamik}} = \frac{\epsilon}{2d^2} (2\sqrt{2}U_o u_{\text{rms}} \sin(\omega t) - u_{\text{rms}}^2 \cos(2\omega t))$$

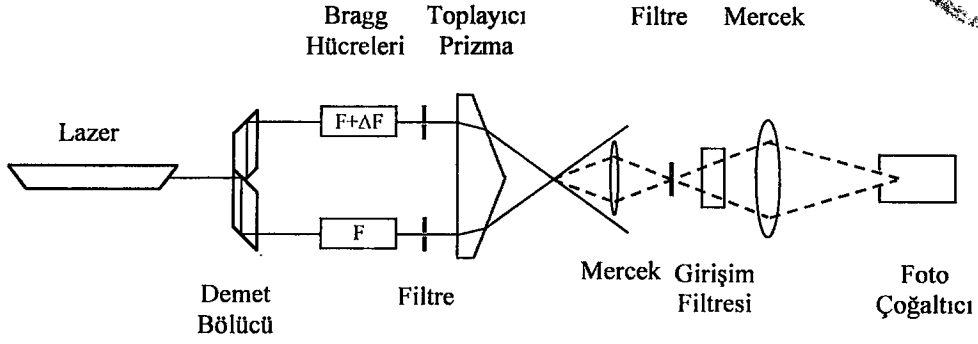
Belirli bir frekansta elektrostatik uyarıcı tarafından mikrofon diyaframına uygulanan eşdeğer ses basınç düzeyi, yukarıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilebilir. Ancak delikli yapısından dolayı elektrostatik uyarıcının alanı, mikrofon diyaframının belirli bir oranını oluşturacaktır. Bu nedenle elektrostatik uyarıcı tarafından diyafram üzerinde oluşturulan eşdeğer ses basıncı Eşitlik (3-6) ifade ile verilebilir [B&K Master Catalogue CD, 1999]:

$$p = \frac{\epsilon U_o u_{\text{rms}}}{d^2} R_{\text{alan}} \quad (3-6)$$

R_{alan} : Uyarıcı ve diyafram alanları oranı, tipik değeri 0.75

3.4. Lazer Doppler Anemometrisi

1981 yılında, mikrofonları kalibre etmek için ilk kez yeni bir yöntem, Taylor tarafından ortaya kondu [Jarvis D.R., 1989]. Bu yeni yöntemde mikrofon, içerisinde hareketli dalgaların olduğu bir dalga tüpünün kenarına monte edildi. Hız ölçümlerinde hava içerisinde asılı duran partiküllerden saçılan lazer ışığı kullanıldı. Saçılan ışıktaki Doppler kayması asılı duran partiküllerin hareketi dolayısıyla havanın parçacık hızı hakkında bilgi vermektedir. Taylor'un Lazer Doppler anemometrisi tekniği için kullandığı optik düzenek Şekil 3.4'te verilmiştir [Taylor, 1981].



Şekil 3.4. Mikrofon kalibrasyonu için Taylor tarafından kullanılan Lazer Doppler Anemometre düzeneğinin optik kısmı

Parçacık hızı, foto çoğaltıcı tarafından algılanan frekans modülasyonuna uğramış sinyalin modülasyon indeksinin ölçümünden belirlenebilmekte ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [Taylor, 1981] :

$$v = \frac{\lambda \beta}{[2\omega \sin(\theta/2)]} \quad (3-7)$$

Burada;

v : Parçacık hızının genliği,

λ : Kullanılan lazerin dalga boyu,

β : Frekans modülasyonlu sinyalin modülasyon indeksi,

ω : Ses dalgasının açısal frekansı,

θ : İki lazer ışını kesişme açısı.

Modülasyon indeksi β , algılanan sinyalin frekans analizinden elde edilebilir. Çünkü spektrumun bileşenlerinin genlikleri, β argümanlı uygun dereceli Bessel fonksiyonlarının büyüklükleri ile orantılıdır. Taylor tarafından yapılan çalışma hareketli dalga tüpü ile 250 ve 500 Hz frekanslarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılıklık yöntemiyle elde edilenlerle karşılaştırılarak karşılıklık yönteminde yapılan varsayımların geçerliliği kontrol edilmiştir.

Lazer Doppler Anemometri tekniği ile yapılan diğer bir çalışma ise 2002 yılında MacGiLivray ve arkadaşları tarafından 600-2000 Hz arasındaki frekanslarda duran dalga tüpü kullanılarak gerçekleştirilmiştir [MacGILIVRAY et al 2002].

3.5. Kapalı Hacim Karşılıklık Kalibrasyonu

Günümüzde mikrofonların kalibrasyonu için en yaygın kullanılan ve en düşük belirsizliğe sahip olan karşılıklık (reciprocity) tekniğidir. Bu teknik başlangıçta dinamik sistemler için Rayleigh tarafından geliştirilmiş, sonraları Ballentine geniş kapsamlı sistemler için tekniği ilerletmiştir. Mclean ve Dubois karşılıklık tekniği için daha genel yaklaşımlarda bulunmuş, sıvılarda uzaklık veya basınç dışında sadece elektriksel büyüklüklere ihtiyaç duyacak, gazlarda ise barometrik basıncın bilinmesini gerektirecek şekilde, karşılıklık tekniği için yenilikler yapmışlardır. Daha sonra Cook ve Olson basınç gradyan mikrofonları ile ilgili başarılı çalışmalar yapmışlardır [Jarvis D.R., 1989].

İki mikrofon, bir bağlaşım kullanılarak akustik olarak birleştirilir. Birisi ses kaynağı diğeri ses alıcısı olarak kullanıldığında elektriksel transfer empedansı ölçülür. Elektrik transfer empedansı alıcı olarak kullanılan mikrofonun ürettiği açık devre gerilimin, ses kaynağı olarak kullanılan mikrofondan geçen akıma oranıdır. Sistemin akustik transfer empedansı bilindiğinde, mikrofonların basınç hassasiyetleri çarpımları belirlenebilir. Üç mikrofonun değişik ikili kombinasyonu kullanıldığında üç adet karşılıklı bağımsız denklem elde edilir ve bundan da her bir mikrofonun mutlak basınç hassasiyeti için bir ifade türetilir. Karşılıklık kalibrasyonlarda kullanılan genel ifadeler şöyledir:

Karşılıklık Mikrofon: Açık devre ters ve düz transfer empedansları büyüklük olarak birbirine eşit olan doğrusal pasif mikrofon.

Mikrofon Basınç Hassasiyetinin Faz Açısı: Bir frekansta, açık devre gerilimi ile mikrofon diyaframı üzerine etkiyen düzgün dağılımlı ses basıncı arasındaki açı.

Elektriksel Transfer Empedans: Akustik olarak birleştirilmiş iki mikrofon sistemi için alıcı olarak kullanılan mikrofonun açık devre geriliminin verici olarak kullanılan mikrofonun terminallerindeki giriş akımına bölümüdür. Birimi Ohm (Ω)'dur.

Akustik Transfer Empedans: Akustik olarak birleştirilmiş iki mikrofon sistemi için alıcı olarak kullanılan mikrofonun diyaframına etkiyen ses basıncının verici olarak kullanılan mikrofon tarafından üretilen kısa devre hacim hızına oranıdır. Birimi (Pa.s/m^3)'tür.

Akustik Bağlaşım: Mikrofonlarla birlikte takıldığında, kapalı bir hacim oluşturan silindirik parça.

Referans Ortam Şartları: Farklı metroloji merkezleri tarafından yapılan ölçümler sonunda belirlenen mikrofon hassasiyetlerinin karşılaştırılabilmesi için hassasiyet değerlerinin verildiği ve uluslararası düzeyde kabul görmüş çevresel şartlardır. Bunlar :

Sıcaklık : $t_r = 23.0 \text{ }^\circ\text{C}$
 Statik Basınç : $p_r = 101.325 \text{ kPa}$
 Nem: $H_r = \% 50$

Laboratuvar standardı mikrofonlar ve bunların benzerleri karşılıklı tip mikrofon olarak değerlendirilir. Mikrofonların iki delikli bir bağlaşım kullanılarak birleştirilmesi (Şekil 3.5) ile ilgili ifadeler şöyle yazılabilir[IEC Pub. 61094-2, 1992]:

$$Z_{11} i + Z_{12} q = U \quad (3-8)$$

$$Z_{21} i + Z_{22} q = p$$

Burada;

p : Mikrofonun akustik terminali (diyafram) üzerine düzgün olarak uygulanan ses basıncı,

U : Mikrofonun elektriksel terminalindeki gerilim,

q : Mikrofonun akustik terminallerindeki (diyafram) hacim hızı,

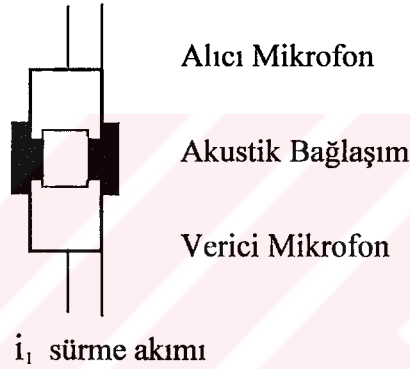
i : Mikrofonun elektriksel terminallerinden geçen akım,

$Z_{11}=Z_e$: Mikrofonun diyaframı bloke olduğunda, mikrofonun elektrik empedansı,

$Z_{22}=Z_a$: Elektrik terminallerinde gerilim yokken mikrofonun akustik empedansı,

$Z_{12}=Z_{21}=M_p.Z_a$: Mikrofonun geri ve ileri transfer empedansları, M_p mikrofonun basınç hassasiyeti,

U_2 açık devre gerilimi



Şekil 3.5. Karşılıklı mikrofon kalibrasyonunda alıcı ve verici mikrofonun bir bağlaşım ile birbirine akustik olarak bağlanması

Eşitlik (3-8) yukarıda verilenler kullanılarak yeniden düzenlenirse aşağıdaki yeni şeklini alır. Mikrofonun diyaframı bloke olduğunda, mikrofonun elektriksel empedansı

$$Z_e i + M_p Z_a q = U \quad (3-9)$$

$$M_p Z_a i + Z_a q = p$$

1 ve 2 numaralı mikrofonların basınç hassasiyetleri M_{p1} ve M_{p2} olarak gösterilsin. 1 nolu mikrofonun elektrik terminallerinden geçen i_1 akımı, (diyaframda $p=0$) $M_{p1}.i_1$ değerinde kısa devre hacim hızı ve 2 nolu mikrofon diyaframında

$p_2 = Z_{a12} \cdot M_{p1} \cdot i_1$ değerinde ses basıncı oluşturur. Z_{a12} sistemin akustik transfer empedansıdır. 2 nolu mikrofonun açık devre gerilimi

$$U_2 = M_{p2} p_2 = M_{p1} M_{p2} Z_{a12} i_1 \quad (3-10)$$

ile verilir. Bu ifade düzenlenirse iki mikrofonun basınç hassasiyeti çarpımı

$$M_{p1} \cdot M_{p2} = \frac{1}{Z_{a12}} \cdot \frac{U_2}{i_1} \quad (3-10a)$$

eşitliğinden elde edilir. Akustik transfer empedansının ve buna bağlı olarak ısı transferi ve kılcal boru düzeltmelerinin hesaplanmaları ile ilgili bilgiler EK A'da bulunabilir. Üç Mikrofon kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda mikrofonun basınç hassasiyetinin büyüklüğü ısı transferi ve kılcal boru düzeltmeleri de dikkate alınarak aşağıdaki ifade verilebilir.

$$|M_{p1}| = \left\{ \left| \frac{Z_{e12} Z_{e13}}{Z_{e23}} \right| \left| \frac{Z_{a23}}{Z_{a12} Z_{a13}} \right| \left| \frac{\Delta_{c12} \Delta_{c13}}{\Delta_{c23}} \right| \right\}^{1/2} \quad (3-11)$$

Burada U_2 / i_1 elektrik transfer empedansı Z_{e12} ile gösterilmiştir. Benzer ifade diğer iki mikrofon için de yazılabilir.

3.6. Hesaplanabilir Klasik Pistonfon

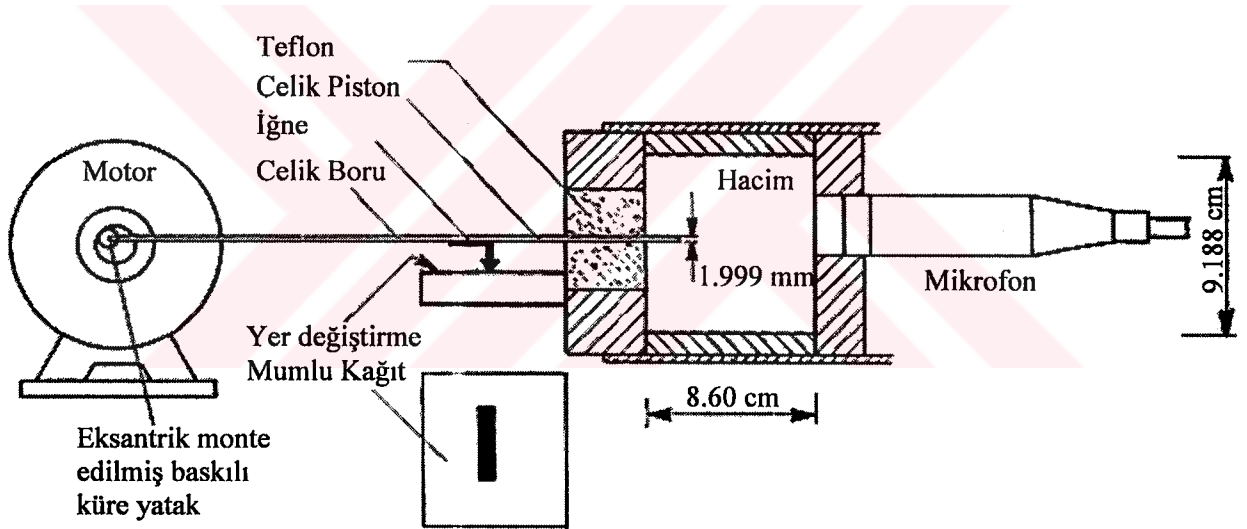
Mikrofon hassasiyetini elde etmenin en basit yolu veya en azından anlaşılması en kolay olanı, mikrofonu değeri bilinen ses basıncına maruz bırakmak ve elektrik terminallerinde oluşan gerilimi ölçmektir. Wente mikrofon üzerine konulan ve içerisinde pistonun hareket ettiği 45 cm^3 hacimli hesaplanabilir pistonfon kullanarak mikrofon hassasiyetini belirledi [21Brüel P.V.-II, 1965]. Piston, bir motor tarafından sürülen krank miline bağlı olarak çalışmaktaydı. Pistonun hareketi sonucu bağlaşım hacmindeki değişim, piston ve krank milinin çapı kullanılarak hesaplanıyordu.

Hesaplanabilir klasik pistonfonun şematik resmi Şekil 3.6'da verilmiştir [21Brüel P.V.-II ,1965]. Hava adyabatik olarak sıkıştırıldığında bağlaşım içerisinde oluşan alternatif basıncın genliği:

$$p = \frac{\kappa \cdot P_o \cdot v}{V_o} \quad (3-12)$$

ifadesi ile verilir [Jarvis D.R., 1989]. Burada:

- κ : Hava için spesifik ısılar oranı
- P_o : Statik ortam basıncı,
- v : Pistonfon bağlaşımının hacmindeki değişim,
- V_o : Silindirik bağlaşımın hacmidir.



Şekil 3.6. Ölçülen bağıl yer değiştirmenin mumlu kağıt üzerine kaydedilen ve 49.8 Hz frekansında çalışan klasik pistonfon [Brüel P.V.-II ,1965].

Modern pistonfonlar tarafından üretilen ses basınç düzeyi birkaç nedenden dolayı yeterince doğru hesaplanamamaktadır. Pistonfon hacmini ölçmek, karmaşık geometri ve takılan mikrofon boyutuna bağımlılık nedeniyle zordur. Piston ve kam millerinin boyutları küçük olduklarından piston hacmindeki değişimi belirlemek daha da zordur. Bu tip cihazlar diğer yöntemlerle kalibre edilmiş mikrofon kullanarak kalibre edilirler. Buna karşın hesaplanabilir modern pistonfonlarda pistonun yer

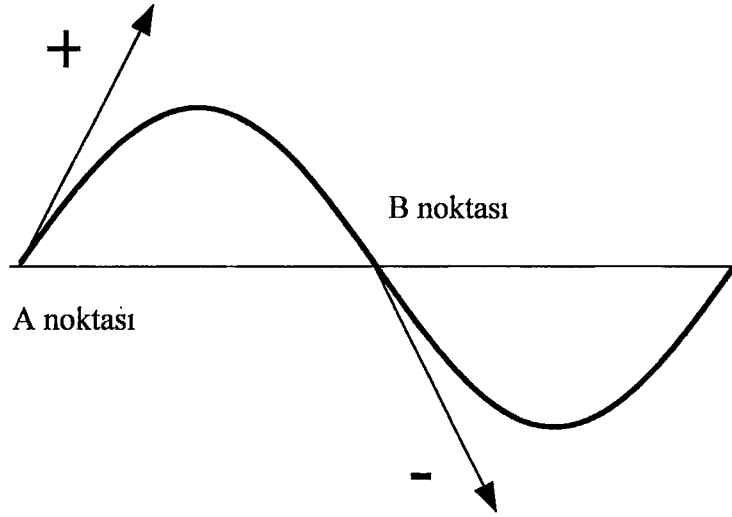
değiştirmesi, dolayısıyla bağlaşımın hacimdeki değişim enterferometre kullanılarak hesaplanmaktadır[Barham R.G., 1993]. Bu tip pistonfonlarda yüksek doğruluğa ulaşmak için büyük boyutlu bağlaşımına sahip olmaları temel bir kısıtlamadır. Bağlaşım içerisindeki ses basıncının her noktada eşit olması ilkesine göre çalışırlar. Bu prensip en büyük boyutlarının, sesin dalga boyunun (λ) 1/20'sinden küçük olması ile sağlanabilir. Bu nedenledir ki hesaplanabilir klasik pistonfonların çalışma bölgeleri birkaç yüz Hz'nin altına sınırlandırılmıştır.

3.6.1. Pistonfon için Basıncı İfadesinin Türetilmesi

Gaz kanunu kullanılarak bir hacim için ses basıncı (basıncı artışı) ve hacimdeki artış değişimi arasında bir ifade verilebilir. Öncelikli olarak sıcaklığının, basıncı P ve hacim V' deki değişimlerle nasıl değiştiğinin bir başka deyişle prosesin adyabatik veya izotermal olup olmadığının belirlenmesi gereklidir.

İşitilebilir seslerin dalga boylarının, hava molekülleri arasındaki mesafeyle kıyaslandığında uzun oldukları görülür. 20 –20000 Hz aralığında işitilebilir seslerin dalga boyları 17.25 m ile 17.25 mm arasında değişirken, moleküller arası mesafe 10^{-9} m mertebesindedir. Kapalı bir hacim içindeki gaz hızlıca sıkıştırılırsa, kinetik enerjilerinin artışından dolayı sıcaklıkları artar, tersi olarak gaz ani olarak genişirse sıcaklığı azalır. Değişken ses alanı içindeki herhangi bir noktada, ortam sıcaklığına göre sıcaklık artar ve azalır. Sıcaklıktaki bu değişim sesin frekansı ile aynı frekansta oluşur ve ses basıncı ile aynı fazdadır. Bir an için ortamda tek frekanslı bir ses dalgası olduğunu ele alalım. Aralarında yarım dalga boyu fark olan iki noktadaki sıcaklık ve basıncı değişimleri birbirlerine göre 180° faz farklı olacaktır.

Normal atmosfer şartları altında termal yayılma dalgasının 1 kHz'te yayılma hızı yaklaşık olarak 0.5 m/s, 10 kHz için 1.5 m/s'dir [Beranek, 1949]. 1 kHz'lik bir sesin yarım dalga boyu (0.1725 m) kadar değişim için gerekli süre 0.0005 sn'dir ve bu süre içinde ısı dalgası sadece 0.00025 m ilerler.



Şekil 3.7. Aralarında yarım dalga boyu bulunan iki nokta arasında ısı yayılımının şematik gösterimi

Görüldüğü üzere ısıtma frekanslarındaki ses dalgalarında ihmal edilebilir ısı değişimi vardır. Gazların bu tip sıkıştırma ve genleşmeleri adyabatik yani ısı değişiminin olmadığı prosesler olarak adlandırılır. Adyabatik genleşme için basınç ve hacim arasındaki ifade aşağıdaki gibi verilir [Beranek, 1949].

$$PV^{\kappa} = \text{Sabit} \quad (3-13)$$

Burada κ sabit basınç altındaki gazın öz ısısının sabit hacimdeki gaz öz ısısına oranıdır. Eşitlik (3-3)'ün tam diferansiyelini alınırsa;

$$V^{\kappa} \cdot dP + \kappa \cdot P \cdot V^{\kappa-1} \cdot dV = 0 \quad (3-14)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3-14)'ün her iki tarafı eşitlik (3-13)'e bölüldüğünde

$$\frac{dP}{P} + \kappa \frac{dV}{V} = 0 \quad (3-15)$$

ifadesi bulunur. Ses dalgası olması durumunda basınç ve hacim $P=P_0+p$ ve $V=V_0+v$ ile ifade edilir. Burada;

P_0 : pertürbasyona uğramamış basınç (Statik ortam basıncı)

p : ses dalgası nedeni ile basınç değişimi

V_0 : pertürbasyona uğramamış hacim

v : ses dalgası nedeni ile hacimdeki değişimi

$p \ll P_0$ ve $v \ll V_0$ yaklaşımı yapılırsa

$$\frac{p}{P_0} + \kappa \frac{v}{V_0} = 0 \quad (3-16)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3-16) yeniden düzenlendiğinde kapalı bir hacim içerisinde harmonik hareket eden bir pistonun yer değiştirmesi sonucu ürettiği ses basıncı genliğinin mutlak değeri için

$$p = \frac{\kappa \cdot P_0 \cdot v}{V_0} \quad (3-17a)$$

veya

$$p = \frac{\kappa \cdot P_0 \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \delta x}{4 \cdot V_0} \quad (3-17b)$$

ifadesi elde edilir. Burada;

v : pistonun yer değiştirmesi sonucu süpürdüğü hacim (pistonfon hacmindeki değişim, m^3 ($= \pi \cdot d_p^2 \cdot \delta x / 4$))

d_p : pistonun çapı, m

δx : pistonun yer değiştirme genliği, m

κ : öz ısılar oranı, ($=1.399$ referans şartlar altında)

P_0 : ortam basıncı, Pa

V_0 : silindirik bağlaşımın hacmi, m^3

4. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Mikrofonların dış kaviteli diyot lazer kullanarak düşük frekans bölgesindeki kalibrasyonlarında aşağıdaki çalışmalar hedeflenmiş ve gerçekleştirilmiştir.

- Kapasitif mikrofonların düşük frekans bölgesinde (63 Hz'den küçük) birincil kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi,

Geometrik Bağımlılık : Mikrofonun ön hacmi ile pistonfonun hacimlerinden oluşan akustik bağlaşımın hacminin belirlenmesi,

Titreştirici Etkisi : Lazer pistonfon düzeneğinde ses kaynağı olarak, elektromekanik bir titreştiriciye bağlı ve sinüzoidal hareket eden bir piston kullanılmaktadır. Pistonun bağlaşım içerisindeki hareketi doğal olarak titreştiricinin frekans tepkisine ve kararlılığına bağlıdır.

Ortam Şartlarının Etkisi : Kapasitif mikrofonlar, ortam basıncı, sıcaklık ve nem gibi çevresel parametrelerden etkilenmektedir. Buna karşın farklı çevresel şartlarda yapılan ölçümleri birbirleriyle karşılaştırmak için belirlenmiş referans ortam şartlarına düzeltmek gereklidir.

Yansımasız odaların (an-echoic chamber) olmadığı durumlarda ses güç düzeyi ölçümleri, ses şiddet ölçümleri aracılığı ile gerçekleştirilir. Ses şiddet ölçümlerinde boyutları aynı, hassasiyetleri, frekans ve faz bağımlılıkları birbirine çok yakın olan mikrofon çiftleri kullanılır. Mikrofon çiftlerinde aranan önemli özellik faz uyumlu olmalarıdır. Yukarıda verilen çalışmaların yanı sıra lazer pistonfon, mikrofonların faz farkı ölçümlerinde de kullanılabilir. Mikrofon çiftleri için lazer pistonfon düzeneğinde karşılıklı olarak yerleştirilen ve aynı ses dalgasına maruz kalan mikrofonların elektrik çıkışları arasındaki faz farkları ölçülebilir.

Tablo 4.1'de mikrofonların düşük frekanslarda dış kaviteli diyot lazer ile gerçekleştirilen kalibrasyonlarında kullanılan cihazların, elektronik ve mekanik elamanların listesi yer almaktadır.

Tablo 4.1. Ölçüm düzeneğini oluşturan cihaz ve elemanlar

Ölçüm Düzeneğinin Alt Bölümleri	Teçhizat, Cihaz	Açıklama
Akustik	Kapasitif mikrofon	Pistonfonun kapalı bağlaşımı içerisinde oluşturulan sesin ölçülmesinde kullanılırlar
	Mikrofon ön yükselteci	
	Ölçüm ön yükselteci	
Optik	ECDL	Yer değiştirme ölçümleri için ışık kaynakları
	He-Ne	
	Ayna	He-Ne lazer kullanıldığında Michelson enterferometresini oluşturan elemanlar
	Demet bölücü	
	Foto detektör	
Mekanik	Kapalı bağlaşım	Lazer pistonfonu oluşturan, içerisinde piston hareketi sonucu ses üretilen kapalı silindirik hacim
	Piston	Bağlaşım içerisinde sinüzoidal hareket eden eleman
	Montaj elemanları (holders)	Optik düzeneği, titreşim kaynağını ve lazerleri metal plakaya monte etmek için kullanılır
	Metal Plaka	Optik düzeneği, montaj elemanları kullanarak titreşimsiz masa üzerinde monte etmek için kullanılır
	Titreşimsiz Masa (Mermer)	Ölçme düzeneğinin üzerinde kurulduğu ve çevresel titreşim kaynaklarından izole edilmiş mermer masa
Ölçüm ve destek cihazları	Sinyal üretici	Pistonun hareketini oluşturan elektrik sinyalini üreten kaynak
	Güç yükselteci	Sinyal üreticinin ürettiği sinyali kuvvetlendirerek titreşim uyarıcıya aktarır
	Titreşim uyarıcı	Pistonun monte edildiği ve elektrik sinyalini mekanik harekete dönüştüren kaynak
	1/3 Oktav bant filtre	Mikrofonun ürettiği sinyalleri filtreleyerek istenilen frekanstaki bileşeninin verir
	Sayısal voltmetre	Mikrofonun ürettiği elektrik sinyali ölçer
	Frekans sayıcı	Oran (Foto detektör üzerindeki sinyalin titreşim sinyaline oranı) ölçümünde kullanılır
	Osiloskop	Sinyal üretici, mikrofon ve foto diyot sinyallerinin dalga formunu görmek için kullanılır
	Sinyal analizörü	Sinyallerin frekans analizlerinde kullanılır
	Sıcaklık kontrol ünitesi	Dış kaviteli diyot lazerin sıcaklığını belli bir değerde tutarak dalgaboyunu kararlı tutar
	Akım kaynağı,	Dış kaviteli diyot lazerin çalıştırmak için kullanılır.

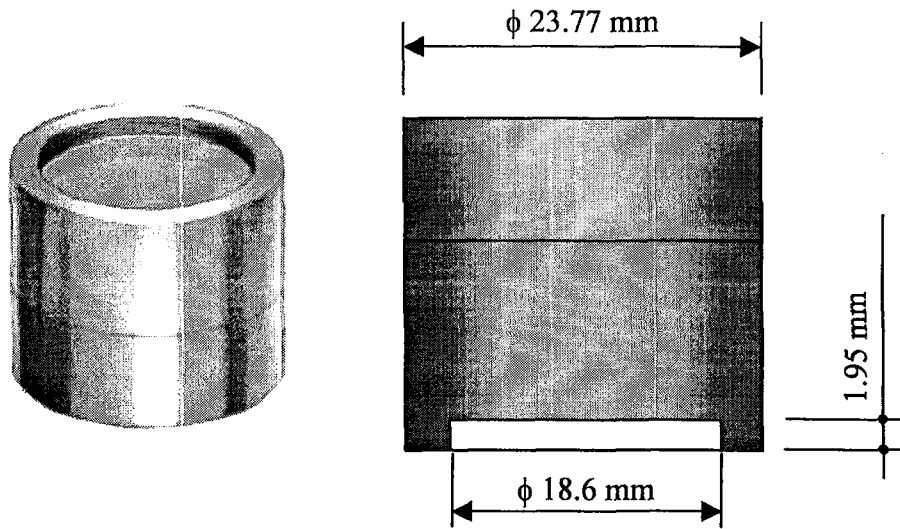
4.1. Ölçüm Düzenineğinin Alt Bölümleri

Bu bölümde ölçüm düzenineğini oluşturan alt gruplar ayrıntılı olarak incelenmektedir.

4.1.1. Akustik Bölümü

Ölçüm sistemin akustik bölümü kapasitif mikrofon kartuşu, mikrofon ön yükselteci ve ölçüm ön yükseltecinden oluşmaktadır.

Tez çalışması kapsamında kullanılan mikrofonlar 1" çapındaki Brüel&Kjaer firmasının 4160 tipindeki mikrofonlarıdır. Metrolojik amaçlı ölçümlerde kullanılan referans standardı olan bu kapasitif mikrofonlar, International Electrotechnique Commission IEC 61094-1 standardına göre basınç tipi laboratuvar standardı (LS1P) olarak sınıflandırılmıştır. B&K 4160 tip kapasitif mikrofonun tipik teknik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Lazer pistonfon kullanılarak kalibre edilen bu mikrofonun boyutları, lazer pistonfonu oluşturan kapalı bağlaşımın hacmini belirlemek için oldukça önemlidir. B&K 4160 tip LS1P mikrofonun boyutları Şekil 4.1'de verilmiştir [Master Catalogue, 1989].



Şekil 4.1. B&K 4160 tip mikrofonun nominal boyutları

Kapasitif mikrofonun diyaframı ile üst kenarı arasındaki 1.95 mm derinliğindeki mesafe, nominal değeri 530 mm³ olan ön hacmi oluşturur ve yaklaşık olarak mikrofon diyaframının bloke edildiği andaki değeridir. Ses basıncı etkisi altında iken diyafram hareket edeceğinden bu ön hacim değişecektir. Ses basıncı etkisi altında iken oluşan ek hacim, eşdeğer hacim değeri adını alır ve değeri 250 Hz’te yaklaşık olarak 150 mm³’tür.

Kapasitif mikrofon, yapısı gereği yüksek empedanslı bir dönüştürücüdür (transducer). Ses basıncı etkisi altında iken, elektrik uçlarında oluşan açık devre gerilimini ölçmek için ön yükseltece ihtiyaç duyulur. Kullanılan mikrofon ön yükselteci yüksek giriş empedansına ve düşük empedans çıkışına sahip olmalıdır. Ölçüm düzeneğinde kullanılan mikrofon ön yükselteci B&K marka 2645 tipindeki bir ön yükselteçtir. Özellikleri Tablo 4.2’de resmi ise Şekil 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. 1” çapındaki B&K 4160 tip mikrofonla birlikte kullanılan B&K 2645 tip ön yükseltecin bazı teknik özellikleri

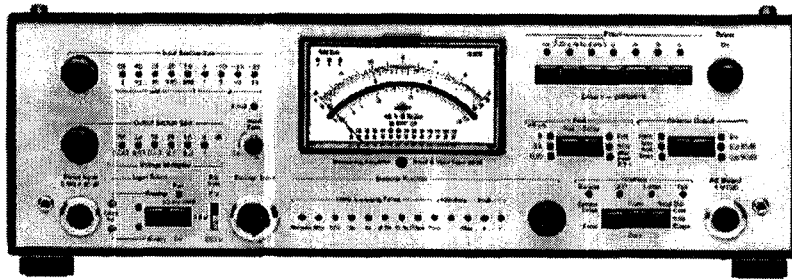
Parametre	Özellik
Frekans Bölgesi	2 Hz – 200 kHz $\pm$ 0.5 dB
Giriş Empedansı	6.6 G Ω // 0.15 pF
Çıkış Empedansı	< 50 Ω
Zayıflatma	< 0.035 dB
Sıcaklık Bölgesi	- 20 °C ile 60 °C arasında
Kablo uzunluğu	2 m
½” den 1” boyutuna dönüşüm	B&K UA 0786 tip adaptör



Şekil 4.2 B&K 2645 tip ön yükselteç[B&K Master Catalogue, 1989].

B&K 2645 tip ön yükseltecin en önemli özelliği, eşdeğer gerilim tekniğine (insert voltage tekniği) imkan vermesidir. Bu özellik kapasitif mikrofonların karşılıklık yöntemine göre veya bilinen bir ses kaynağına göre kalibrasyonlarının yapılması imkanını vermektedir. Kısaca eşdeğer gerilim tekniği şöyledir. Belirli bir ses basıncına maruz kalan mikrofonun elektrik terminallerinde açık devre gerilimi oluşur. Bu gerilimi ölçmek için mikrofonun empedansını değiştirmeden mikrofon tarafından üretilen gerilim ile aynı frekansta olan ve dış bir sinyal kaynağı tarafından üretilen elektrik sinyali, mikrofonun elektrik terminallerine uygulanır. Mikrofonun kendisinin ürettiği gerilim ile eşdeğer hale gelene kadar sinyal kaynağı gerilimi değiştirilir. Denge noktasına ulaşıldığında sinyal kaynağından uygulanan elektrik sinyal voltmetre ile ölçülür.

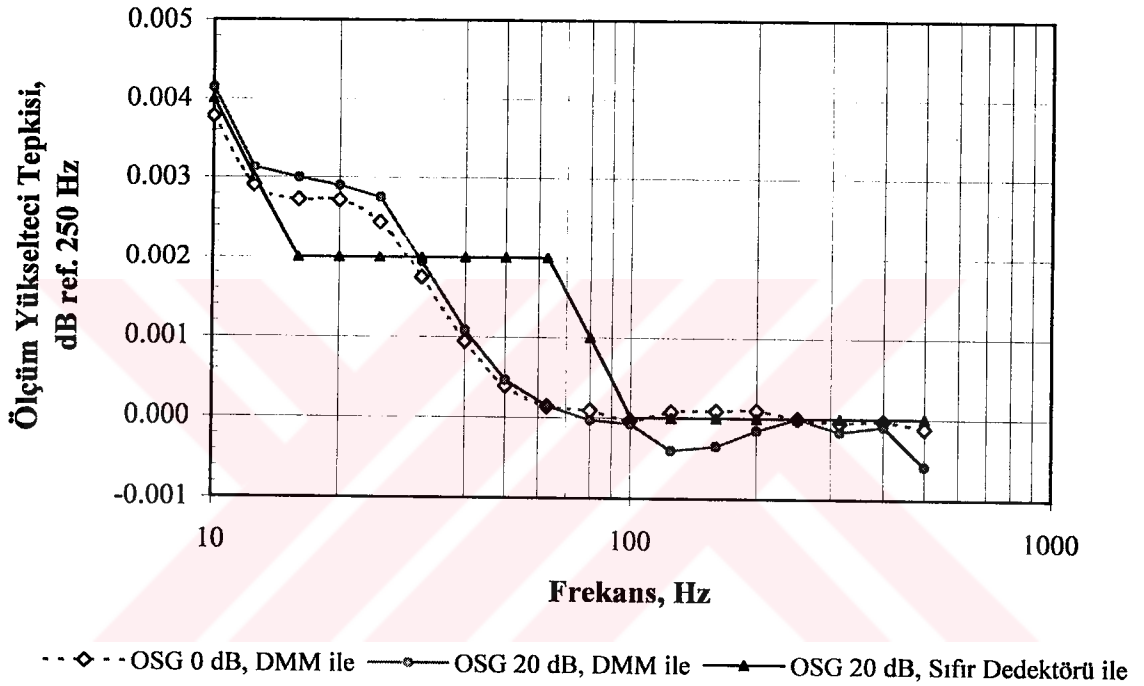
Kapasitif mikrofonun çalışabilmesi için ihtiyaç duydukları polarizasyon gerilimi, mikrofon ön yükselteci aracılığıyla mikrofon güç kaynağından veya ölçüm yükseltecinden (measuring amplifier) sağlanmaktadır. Ölçüm yükseltecinin diğer özellikleri arasında, mikrofon tarafından üretilen gerilimi arttırmak veya zayıflatmak, harici bant geçirici filtreler yardımı ile istenilen frekans bileşenlerini elde etmek, sinyallerin zamana göre değişimlerini incelemek üzere zaman ağırlık filtreleri vardır. Tipik bir ölçüm yükseltecinin resmi Şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3 B&K 2636 tip ölçüm ön yükselteci, [Master Catalogue, 1989].

Ölçüm yükselteci genel amaçlı bir cihaz olduğu için mikrofon ön yükselteç girişinin yanı sıra doğrudan gerilim uygulayabileceğiniz Direkt girişi de vardır. Bu iki giriş, giriş seçici anahtardan sonra birleşmiştir. Mikrofon çıkış sinyali üzerinde doğrudan etkisi olduğundan performansı belirlenmelidir. Bu işlem aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Sinyal giriş ve çıkış katı kazançları (input section gain, ISG and output section gain, OSG) 0 dB olduğu zaman doğrusallık ve frekans kontrolü yapılmıştır. Ölçüm yükseltecinin doğrusallık ve frekans tepkisini belirlemek için Stanford Research Systems DS360 tip sinyal üretici, Datron 1271 tip sayısal voltmetre ve B&K 5908 tip sıfır detektörü (expanded meter) ile iki ayrı yöntem kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yükseltecinin frekans tepkisinin belirlenmesi sırasında elde edilen değerler Şekil 4.4 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.

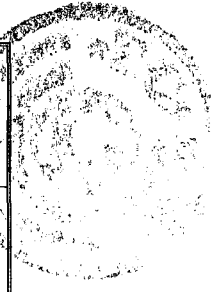


Şekil 4.4. B&K 2636 tip ön yükseltecin frekans tepkisi

Şekil 4.4'te ölçüm yükseltecinin üç farklı şekilde elde edilmiş frekans tepkisi görülmektedir. OSG 0 ve 20 dB DMM ile yapılan ölçümlerde DS360 sinyal kaynağından alınan sinyal ölçüm yükseltecinin girişine bağlandı. 2636 tip ölçüm yükseltecinin çıkışı Datron DMM ile ölçüldü. Ayrıca sinyal kaynağının çıkışı hiçbir değişiklik yapılmadan yine DMM ile ölçüldü. Ölçülen değerler 250 Hz frekansındaki değer referans alınarak dB ölçeğine geçildi. İki ölçümün farkının alınmasıyla ölçüm yükseltecinin o frekanstaki tepkisi elde edilmiş oldu. Sıfır detektörü ile yapılan ölçümlerde ise fark bulma işlemi sıfır detektör üzerinden gerçekleştirildi.

Tablo 4.3 B&K 2636 tip ölçüm yükseltecinin frekans tepkisi ölçüm sonuçları

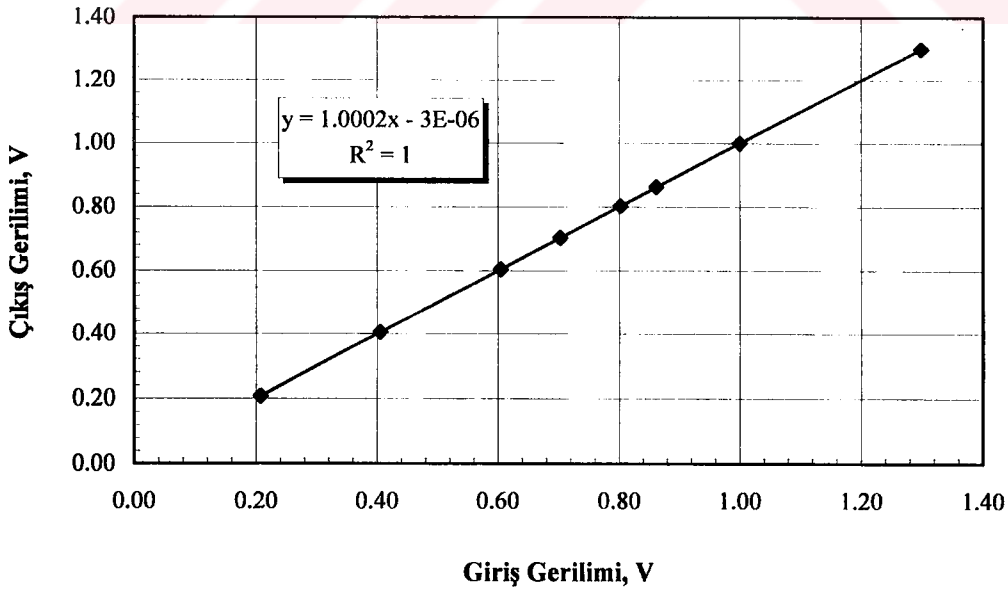
Frekans Hz	DMM ile yapılan ölçümler										Sıfır Detektörü ile Yapılan Ölçümler									
	ISG 1 V					OSG 0 dB					ISG 1 V					OSG 20 dB				
	DS360+2636 (V)	DS360 (V)	DS360+2636 Tepkisi (dB)	DS360 Tepkisi (dB)	2636 Tepkisi (dB)	DS360+2636 (V)	DS360 (V)	DS360+2636 Tepkisi (dB)	DS360 Tepkisi (dB)	2636 Tepkisi (dB)	Sapma, dB Ref 250 Hz SDS360+2636	Sapma, dB Ref 250 Hz DS3602636	Frekans Tepkisi (dB)	2636						
10	0.901980	0.901625	0.015	0.011	0.004	0.902108	0.901552	0.014	0.010	0.004	-0.002	-0.006	0.004	0.004						
12.5	0.903655	0.903390	0.031	0.028	0.003	0.903779	0.903327	0.031	0.027	0.003	-0.001	-0.004	0.003	0.003						
16	0.905240	0.904993	0.046	0.043	0.003	0.905353	0.904914	0.046	0.043	0.003	0.000	-0.002	0.002	0.002						
20	0.903933	0.903687	0.034	0.031	0.003	0.904042	0.903614	0.033	0.030	0.003	0.000	-0.002	0.002	0.002						
25	0.903337	0.903120	0.028	0.025	0.002	0.903445	0.903032	0.027	0.025	0.003	0.000	-0.002	0.002	0.002						
31.5	0.905903	0.905758	0.052	0.051	0.002	0.906017	0.905688	0.052	0.050	0.002	0.000	-0.002	0.002	0.002						
40	0.905155	0.905094	0.045	0.044	0.001	0.905261	0.905021	0.045	0.044	0.001	0.000	-0.002	0.002	0.002						
50	0.903405	0.903402	0.029	0.028	0.000	0.903512	0.903338	0.028	0.028	0.000	0.000	-0.002	0.002	0.002						
63	0.903569	0.903592	0.030	0.030	0.000	0.903670	0.903529	0.030	0.029	0.000	0.000	-0.002	0.002	0.002						
80	0.906383	0.906411	0.057	0.057	0.000	0.906472	0.906348	0.056	0.056	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.001						
100	0.906584	0.906625	0.059	0.059	0.000	0.906685	0.906566	0.058	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
125	0.901755	0.901784	0.013	0.013	0.000	0.901943	0.901858	0.013	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
160	0.902750	0.902778	0.022	0.022	0.000	0.902918	0.902827	0.022	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
200	0.901285	0.901312	0.008	0.008	0.000	0.901443	0.901332	0.008	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
250	0.900445	0.900482	0.000	0.000	0.000	0.900604	0.900478	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
315	0.902796	0.902838	0.023	0.023	0.000	0.902940	0.902830	0.023	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
400	0.902007	0.902047	0.015	0.015	0.000	0.902142	0.902025	0.015	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
500	0.900661	0.900710	0.002	0.002	0.000	0.900887	0.900821	0.003	0.003	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000						



Ölçüm yükseltecinin doğrusallığının kontrolü, DS360 sinyal kaynağından 250 Hz frekansında 200-1300 mV arasında değişen sinyaller kullanarak ölçüldü. Ölçüm sonuçları Tablo 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Ölçüm Yükseltecinin Doğrusallık Ölçüm Sonuçları

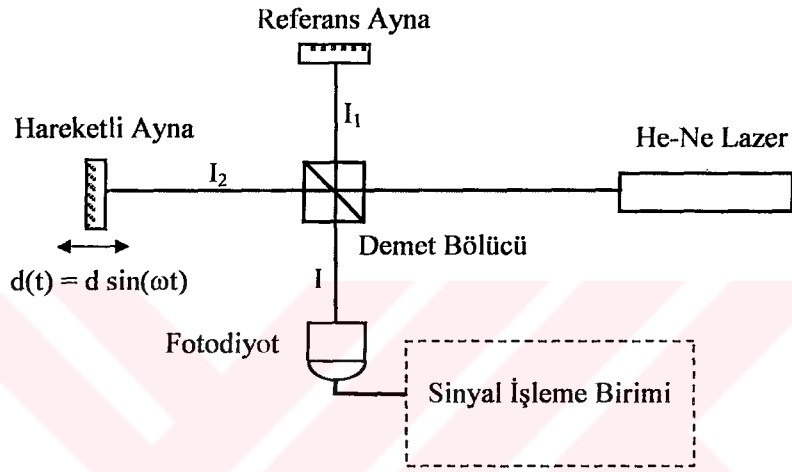
Sinyal Kaynağı Çıkış Gerilime (Volt)	Ölçüm Yükselteci Çıkışı Gerilimi (Volt)	Ölçüm Yükselteci Kazancı (dB)
0.207210	0.207227	0.0007
0.405210	0.405275	0.0014
0.702821	0.702963	0.0018
0.604510	0.604684	0.0025
0.862060	0.862254	0.0020
0.802550	0.802675	0.0014
0.999916	1.000152	0.0020
1.298650	1.298880	0.0015



Şekil 4.5. B&K 2636 tip ön yükseltecin doğrusallık grafiği

4.1.2. Optik Bölümü

Lazer pistonfonun kapalı bağlaşımı içerisinde hareket eden pistonun yer değıştirmesini ölçmek için kullanılan enterferometrenin optik bölümü, iki ayrı fazda gerçekleştirilmiştir. Birinci fazda Michelson enterferometresi, 632.8 nm dalga boyuna sahip frekans kararlı He-Ne lazer kullanılmıştır. En basit haliyle bir Michelson enterferometresi Şekil 4.6'da görölmektedir.



Şekil 4.6. Michelson enterferometresinin şematik gösterimi

Michelson enterferometresi, optik masa üzerinde birbirine 90°'lik açı yapan ve birisi ω açısal frekansında $d(t)$ yer değıştirmesi yapan, diğeri sabit iki aynadan yansıyan iki koherent ışının üst üste bindirilmesi ile oluşturulur. Foto diyot tarafından algılanan sinyalin genliğı aynaların yansıtma özelliklerine bağıdır. Bu nedenle aynaların yansıtıcılıklarının enterferometrede kullanılan lazerin dalga boyundaki değıerlerinin en azından %90 olması beklenir. Genellikle bu tür düzeneklerde 632.8 nm dalga boyuna sahip He-Ne lazeri kullanılmaktadır. Lazer ışını, demet bölücü yardımıyla iki kola ayrılarak sabit ayna ve hareketli bir titreşim kaynağının üzerine monte edilmiş hareketli aynanın (veya parlatılmış bir yüzey) yüzeyinden yansımaktadır. iki farklı yüzeyden yansıyan ışınlar, bir foto diyot üzerinde birleştirildiğinde, enterferometredeki kollar arasındaki yol farkından dolayı enterferometrik desen (girişim saçığı) oluşur. Foto diyot üzerindeki optik sinyalin şiddeti Eşitlik (4-1)'deki gibi verilir :

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(l_2 - l_1)\right] \quad (4-1)$$

Burada,

I_1, I_2 : sabit ayna ve hareketli ayna yüzeylerinden yansıyan ışınların şiddetleri,

$l_2 - l_1$: enterferometredeki kollar arasındaki yol farkı,

λ : lazerin dalga boyudur.

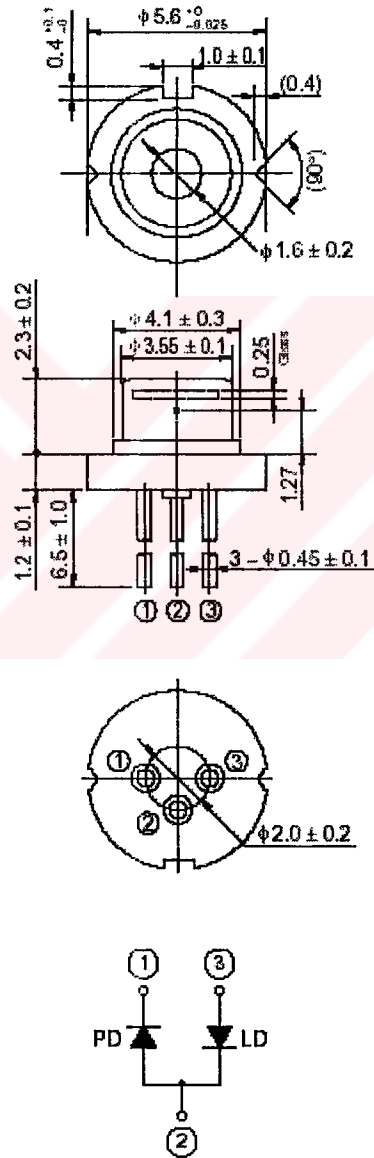
Eşitlik (4-1) iki bileşenden oluşmaktadır. $I_1 + I_2$ terimi sabit bir değer olup, foto diyot çıkışındaki sabit gerilimi (DC - ofset) oluşturur. Geriye kalan diğer terim ise, girişim saçığının oluşturan bileşen olup, foto diyotun çıkışındaki değişken gerilim olarak algılanacaktır. Enterferometrenin hareketli kolundaki $\lambda/2$ 'lik yer değiştirme, foto diyotun çıkışında elektrik puls üretir. Bir yer değiştirme periyodundaki puls sayısı veya girişim saçığı sayısı R_f , Oran Sayıcı ile sayılır. Girişim saçığı sayısı yer değiştirme genliği ile doğru orantılıdır. Enterferometrenin hareketli kolundaki yer değiştirme, eksenel hareket eden titreşim kaynağı tarafından sağlanır. Titreşim frekansı ve genliği, Sinyal üretici ve güç yükselteci yardımıyla ayarlanabilir. Yer değiştirme frekansının bir periyodunda, hareketli ayna $4.8x$ genliği kadar hareket eder. Bu bilgilerden pistonun yer değiştirme genliği (tepe değeri) ile girişim saçığı sayısı arasında

$$\delta x = R_f \frac{\lambda}{8} \quad (4-2)$$

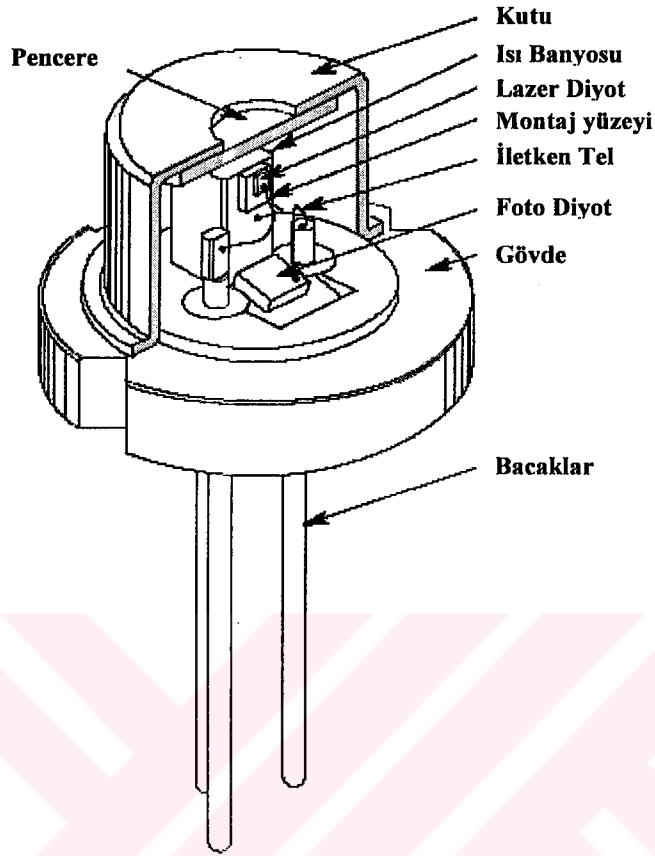
bağıntısı elde edilir. Eşitlik (4-2) kullanılarak lazer pistonunun içerisinde hareket eden pistonun yer değiştirmesi hesaplanır.

Ölçüm düzeneğinin ikinci aşamasında, dış kaviteli diyot lazerin oluşturulması için içerisinde foto diyot olan, nominal dalga boyu 660 nm olan Hitachi model HL6501MG diyot lazer kullanılmıştır. Lazer diyotun çalışması için kararlı akım kaynağına ve diyot lazerin dalga boyunun kararlılığı için sıcaklık kontrol ünitesine ihtiyaç vardır.

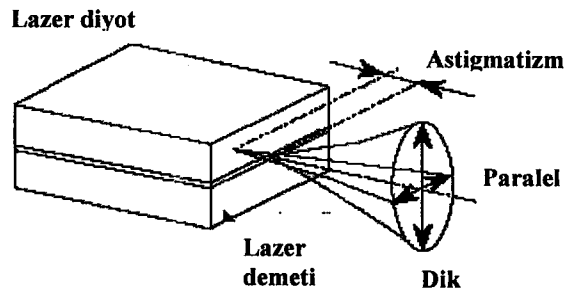
HL6501MG diyot lazer, çoklu kuantum çukurlu 0,65 μm bandında çalışan AlGaInP lazer diyottur. Diyot lazerin şematik yapısı Şekil 4.7'de, çeşitli parametrelere göre performans eğrileri Şekil 4.8. ve 4.9'da, bazı tipik özellikleri de Tablo 4.5.'te verilmiştir [HL6501MG Visible High Power Laser Diode, ADE-208-515F (Z) Preliminary 7th Edition February, 1998].



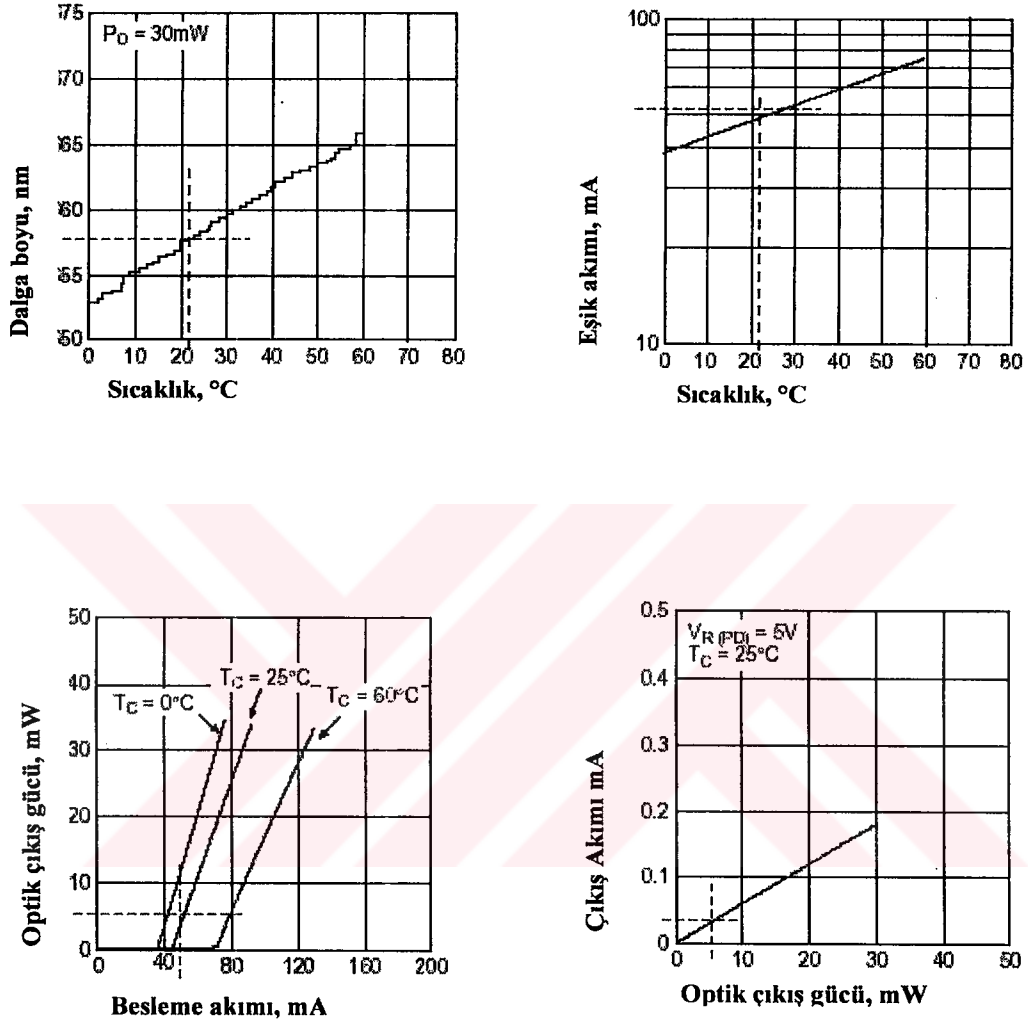
Şekil 4.7. HL6501MG diyot lazerin boyutları ve elektrik bağlantı pinlerinin açıklaması, (ölçüler mm birimi cinsindendir)



Şekil 4.8. HL6501MG diyot lazerin iç yapısı



Şekil 4.9 Diyot lazerlerde dışarı salınan lazer demetinin profil yapısı

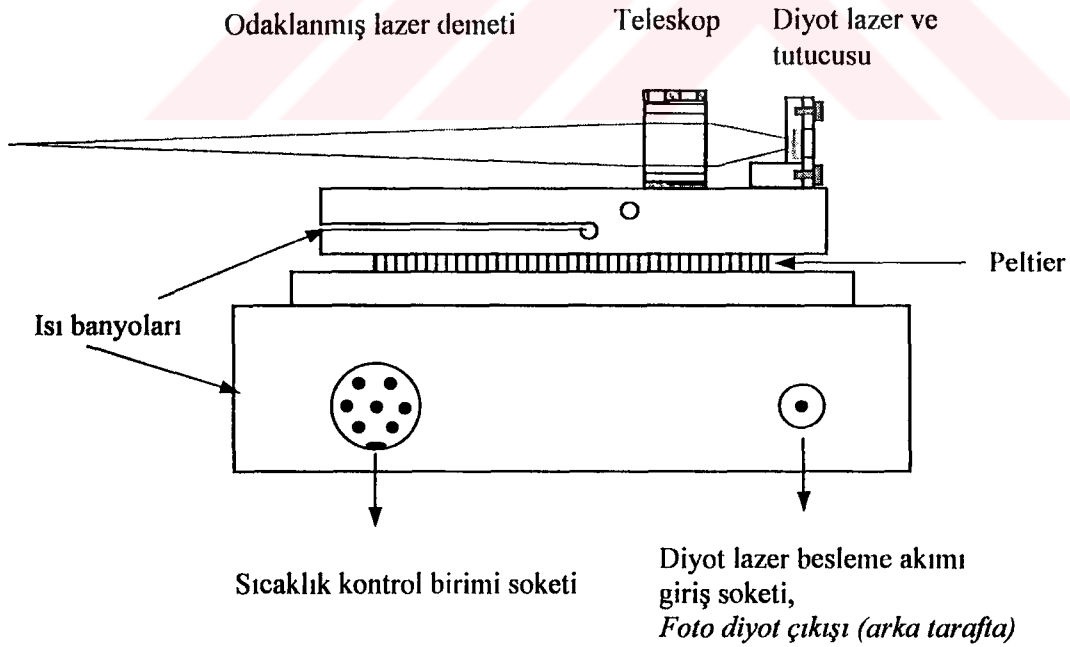


Şekil 4.10 HL6501MG Diyot lazerde, parametrelerin birbirini ile bağımlılıkları gövde sıcaklığı-dalgı boyu, kutu sıcaklığı-eşik akımı, eşik akımı-optik çıkış gücü ve optik çıkış gücü-izleme akımı,

Lazer diyotun Şekil 4.10'da verilen parametrelerinin ölçüm düzeneğinde kullanılan değerleri grafikler üzerinde kesikli çizgilerle verilmiştir. HL6501MG tip diyot lazer kullanılarak oluşturulan dış kaviteli diyot lazerin yapısı Şekil 4.11'de verilmiştir.

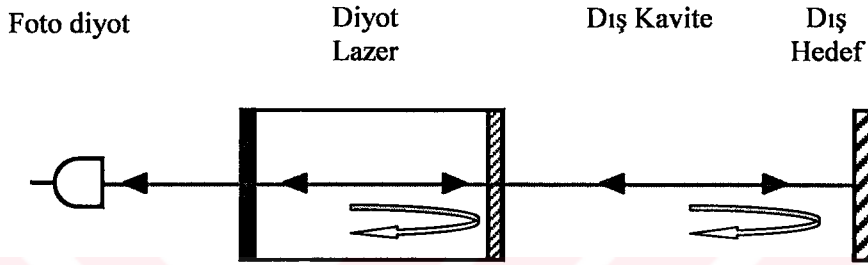
Tablo 4.5. Hitachi HL6501MG tip diyot lazerin nominal teknik özellikleri
(Paket sıcaklığı 25 °C)

Parametre	Değeri
Dalga boyu	658 nm
Optik çıkış gücü	35 mW (CW)
Eşik akımı	45 mA
Çalışma gerilimi	2.6 Volt
Diyot lazer ters gerilimi	2 Volt
Foto diyot ters gerilimi	30 Volt
Foto diyot çıkış akımı	0.3 mA
Çalışma sıcaklık aralığı	- 10 °C ile 60 °C
Diyot eklemine paralel ayrılma (divergence)	8.5 °
Diyot eklemine dik ayrılma (divergence)	22 °
Astigmatizm	6 µm
Paket çapı	φ 5.6 mm



Şekil 4.11. HL6501MG tip diyot lazer kullanılarak oluşturulan dış kaviteli diyot lazer,

Dış kaviteli diyot lazerler kullanılarak gerçekleştirilen yer değiştirme ölçümlerindeki geri beslemeli tip enterferometrenin esası şöyledir. Diyot lazer tarafından üretilen ışık demeti, dış bir hedefin yüzeyine mikro objektif lens kullanılarak odaklanır ve bu yüzey tarafından tekrar lazerin iç kavitesi içerisine yansıtılır (Şekil 4.12). Hedefin yüzeyi diyot lazer için ikinci bir kavite oluşturur. Hedeften ve diyot lazerin ön penceresinden yansıyan ışınlar foto diyot girişim yapar ve monitör akımını oluşturur.



Şekil 4.12. Diyot lazerli geri besleme tip enterferometrenin şematik çizimi,
[Donati et al, 1995]

Yansıyan ışığın şiddeti, hedefin yüzeyine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Çok parlak yüzeyler için lazer kavitesine geri dönen ışığın lazerin kararlılığını bozmaması için optik filtreler kullanılır. Dış hedefin hareket etmesine bağlı olarak lazerin gücünde ve frekansında modülasyon olur. Lazer çıkış gücünün ve frekansının analizi sonucu hedefin yer değiştirmesi belirlenir. Yer değiştirme belirlenmesi sırasında hedefin titreşim frekansına bağlı olarak girişim deseni sayma yöntemi kullanılır.

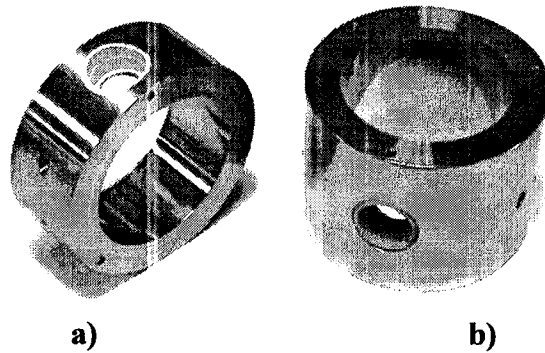
4.1.3. Mekanik Bölümü

Pistonfon, kapalı bir bağlaşım içerisinde bir pistonun doğrusal hareketine göre ses üreten bir kaynaktır. Lazer pistonfon ise kapalı silindir şeklindeki bir bağlaşım içerisinde eksen boyunca doğrusal olarak hareket eden dairesel kesitli bir pistonun yer değiştirmesi ile ses basıncı oluşturan bir ses kaynağıdır. Bağlaşım içerisinde üretilen ses basınç düzeyi, lazer enterferometre kullanılarak belirlenir. Lazer

pistonfonun mekanik bölümü; kapalı bağlaşım, piston, montaj elemanları ve bunları üzerinde tutan metal plaka ile titreşimsiz masadan oluşmaktadır.

Lazer pistonfonu oluşturan akustik bağlaşım silindirik yapıda bir boşluktur. Akustik bağlaşımın boyutları, içerisinde üretilen ses basınç değerinin belirlenmesi aşamasında oldukça önemlidir. Bağlaşımın boyutlarından kaynaklanan belirsizlik bileşeni değerinin etkisini azaltmak için, hacim yeterince büyük olmalı ve değeri doğru olarak belirlenmelidir. Aksi taktirde; değeri akustik veya boyut ölçümleri ile belirlenen bağlaşımın hacminden kaynaklanan hata, ses basıncı hesaplamalarında etkili olacaktır.

Lazer pistonfonun çalışması sırasında, akustik bağlaşımı içerisindeki ses basıncı her yerde üzerinde eşit olmalı, özellikle de mikrofon diyaframı üzerinde düzgün dağılım göstermelidir. Koşulun sağlanabilmesi için dalga hareketinin temel teorisine göre bağlaşımın en büyük boyutu, lazer pistonfonun kullanılabileceği üst frekanstaki dalga boyunun 1/20'si kadar olmalıdır [Jarvis D.R., 1989]. Bu koşul dikkate alınarak lazer pistonfonun 250 Hz üst frekans limiti için kapalı bağlaşımın çap ve uzunluğu nominal olarak sırasıyla 74.3 ve 78.7 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar kullandığında LS1P tip mikrofonun ön hacmini de içine alan akustik bağlaşımın toplam hacmi 342 cm³ olarak belirlenmiştir. Hacmin tam değeri devam eden bölümlerde yapılan hesaplamalarla verilmektedir. Lazer pistonfonun akustik bağlaşımı Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Lazer pistonfonun silindirik kavitesini oluşturan farklı hacimlere sahip akustik bağlaşım, a) 175 cm³ ve b) 340 cm³ akustik bağlaşım

Bağlaşımın tabanlarından birisinin merkezinde, lazer ışını geçiren optik cam vardır. Diğer tabanında ise sinüzoidal hareket eden bir piston bulunur. Pistonun bağlaşım içerisinde kalan dairesel kesitli yüzeyi, lazer ışın demetini yansıtacak kalitede parlatılır. Bağlaşımın yanal yüzeyinin tam orta noktasında, kalibre edilecek 1" boyutundaki kapasitif mikrofon için bir delik bırakılmıştır. Mikrofon monte edildiğinde kapalı bir hacim oluşur.

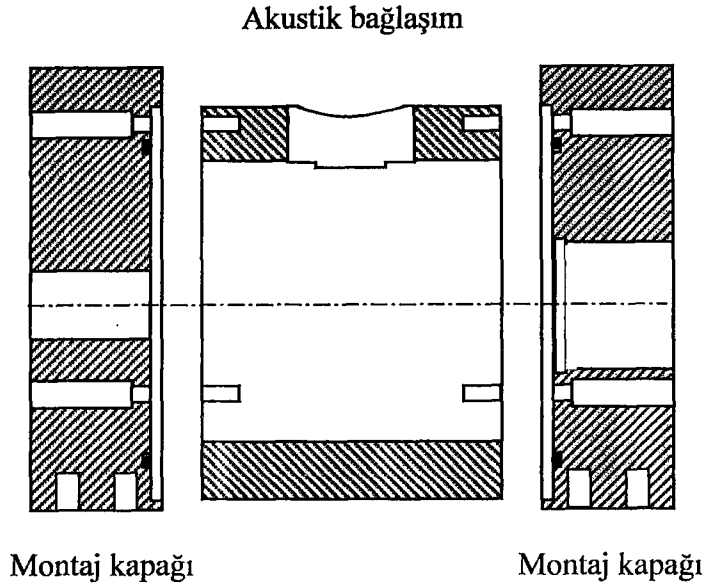
Bağlaşım içerisindeki basıncı dış ortam basıncı ile dengelemek için akustik bağlaşımın yanal kenarlarının orta noktalarında 0.7 mm çapında basınç dengeleme delikleri açılmış ve bu deliklere, " 1 " boyundaki kılcal borular takılmıştır. Lazer pistonfonun alt frekans limitini belirleyen parametre basınç kaçaklarıdır. Bağlaşım içerisinde oluşturulan basıncın zamana göre azalması ölçülerek alt frekans limiti belirlenir. Alt frekans limiti hesaplamaları Eşitlik (4-3) ile yapılır [Jarvis D.R., 1989].

$$f_a = \frac{1}{t_c} = \frac{P_o \pi r^4}{8 \eta l V_o} \quad (4-3)$$

Burada;

- f_a : pistonfonun alt frekans limiti,
- t_c : basınç dengeleme zamanı,
- P_o : dış ortam basıncı, (= 101325 Pa)
- r : kılcal boru yarıçapı, (= 0.000167 m)
- η : havanın viskozitesi, (= 0.0000183 Pa.s)
- V_o : kullanılan akustik bağlaşımın hacmi, m³

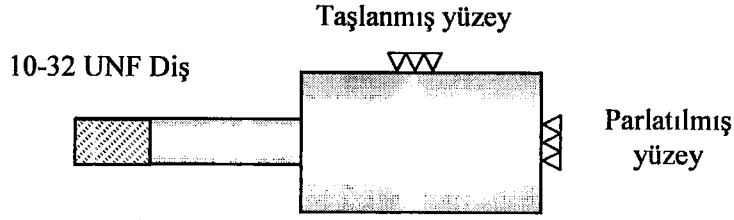
Nominal hacimleri, 175 cm³ ve 350 cm³ olan iki bağlaşım kullanıldığında hesaplanan alt frekans limiti sırasıyla, 0.19 ve 0.10 Hz'dir. Bu tip sistemlerde genel olarak alt frekans değeri 1 Hz alınır fakat işitme aralığı ve mikrofonların kalibrasyon bölgeleri dikkate alınarak alt frekans limiti olarak 10 Hz belirlenmiştir. Basınç kaçaklarını önlemek amacıyla kapalı bağlaşımın monte edilen parçaları arasında kauçuk conta (o-ring) konulmuştur (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Lazer pistonfonun silindirik bağlaşımın montajı ve o-ring kullanımı

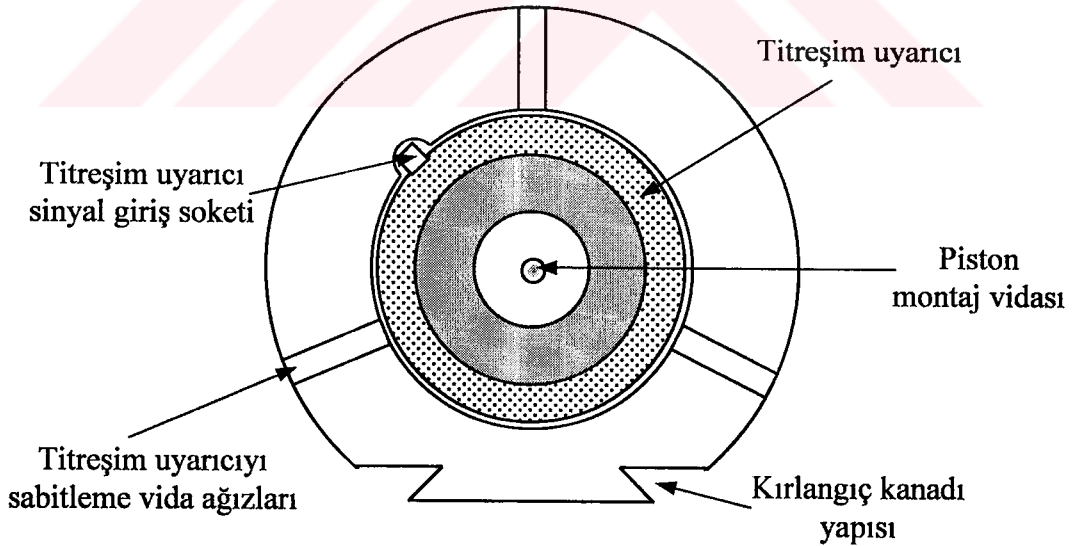
Lazer pistonfonun bağlaşımının montajı kolay ve çok amaçlı olarak tasarlanmıştır. Örneğin çapı 1" den farklı olan mikrofonlar, bağlaşım üzerindeki mikrofon portuna adaptör takılarak kalibre edilir. Ses şiddeti ölçümlerinde kullanılan kapasitif mikrofonların faz ölçümleri, sisteme yanında iki adet mikrofon portu olan diğer bir bağlaşım takılarak gerçekleştirilebilir.

Kapalı bağlaşım içerisinde ses basıncı oluşmasını sağlayan pistonfonun sinüzoidal hareketidir. Piston, iki adet işlevi yerine getirmelidir. Bunlardan birincisi bağlaşımın sol montaj kapağını yatak olarak kullanıp eksenel hareket etmek, ikincisi ise yer değiştirme ölçümlerinde kullanılmak üzere enterferometre düzeneklerinde hareketli ayna rolünü üstlenmek. Bağlaşım içerisindeki pistonun doğrusal hareketinde oluşan distorsiyon ve pistonun eksenel hareketinde olabilecek salgı, bağlaşım içerisinde ses basıncının üzerinde etkili olan parametrelerdir. Bu nedenle pistonun yatak içerisinde kalan boyu yeterince uzun olmalıdır. Tasarım parametresi olarak bu değer 35 mm olarak belirlenmiştir. Piston Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15. Lazer pistonfonunun pistonu

Pistonun aksenal hareketini kolayca yapabilmesi için silindirik yüzeyi taşlanmış, yatak ile arasındaki mesafe 20 μm olarak belirlenmiştir. Pistonun düzgün hareket yapabilmesi için, içerisindeki tane büyüklükleri bir mikron mertebelerinde olan elmas pasta kullanılarak yatak ile piston birbirlerine alıştırılmıştır. Piston, sinüzoidal olarak hareket etmesini sağlayan bir titreştiriciye vida ile mekanik olarak bağlıdır. Titreştirici, elektro-dinamik bir titreşim uyarıcısıdır. Titreştiriciyi monte etmek için Şekil 4.16'da görülen bir mekanizma kullanılmaktadır.

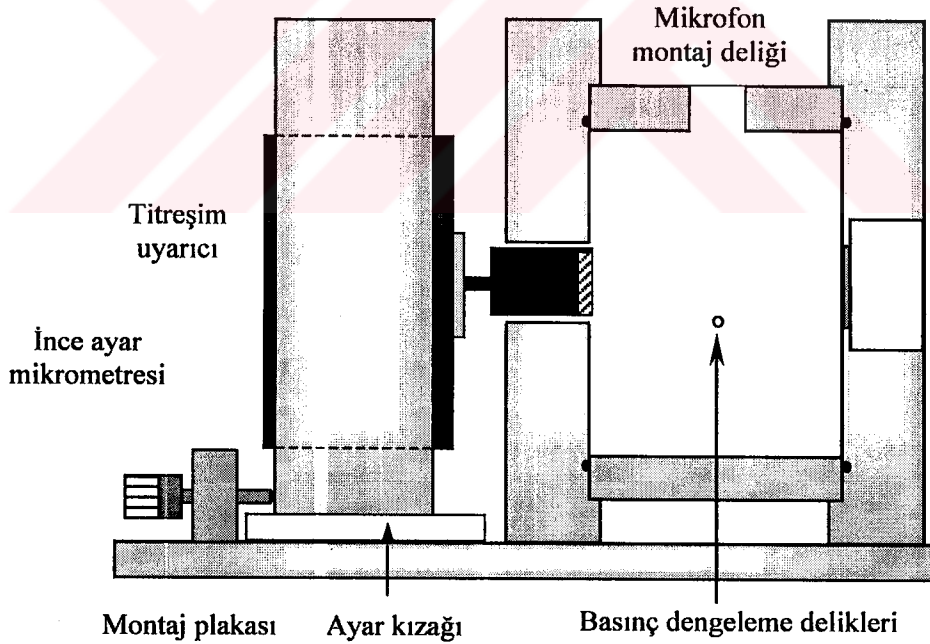


Şekil 4.16. Titreştiricinin monte edilmesinde kullanılan aparat

Titreşim uyarıcının monte edilmesinde kullanılan bu aparatın çevresinde birbirlerinden 120° lik açıda konumlandırılmış sıkıştırma vidaları bulunmaktadır.

Aparatın iç çapı, titreşim uyarıcının dış çapından 0.8 mm daha büyüktür. İkisinin arasında kalınlığı 0.3 mm olan sac konulmuştur. Pistonun dairesel kesitli yüzeyinin akustik bağlaşımın düz kenarında olabilmelerini sağlamak için ayar mekanizması gereklidir. Bu nedenle uyarıcı montaj aparatının alt bölümü, bir kızak üzerinde kaymasını sağlayan ve kırlangıç kuyruğu tabir edilen bir yapıda imal edildi. Ayrıca bu bölüme mekanik ayar için bir mikrometre monte edildi. Piston, olması gereken konuma getirildikten sonra titreşim uyarıcı montaj aparatı, kızakların kenarlarında bulunan sıkıştırma vidaları ile sıkıştırılarak sabitlendi.

Pistonfon sistemini oluşturan parçalar, ortam şartlarının etkilerinin en aza indirilmesi ve rijitliğin sağlanması amacıyla paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Lazer enterferometre ve pistonfon mermer bir masa üzerindeki metal plakaya monte edilerek dış titreşimlerden izole edilmesi sağlanmıştır. Lazer pistonfonu oluşturan mekanik parçaların monte edilmiş hali Şekil 4.17’de görülmektedir.



Şekil 4.17. Lazer Pistonfonun mekanik parçalarının monte edilmiş şekli

4.1.4. Ölçüm ve Destek Cihazları

Lazer pistonfonu oluşturan yapısal bölümden sonra sistemin çalışması ve ölçümleri yapmak için gerekli olan cihaz ve teçhizatı inceleyelim. Kullanılma amaçlarına göre bu teçhizat üç gruba ayrılabilir. Bunlar:

- Mekanik hareket üretiminde kullanılanlar,
- Lazerleri çalıştırmak için kullanılanlar,
- Parametre ölçümünde kullanılanlar.

Mekanik hareket üretmekte kullanılan cihazlar ve kısaca teknik özellikleri şöyledir:

Titreşim Uyarıcı: Lazer pistonfonda titreşim uyarıcı olarak B&K 4810 tip titreşim uyarıcı kullanılmıştır. Titreşim uyarıcı, elektro-mekanik bir dönüştürücüdür. Uyarıcının bobinlerine, sinyal üreticiden gelen ve güç yükseltici ile kuvvetlendirilen alternatif gerilim uygulandığında, uyarıcının kafası yer değiştirme yapacaktır. Uygulanan gerilimin genliği ve frekansı değiştirildiğinde hareketli kafanın yer değiştirmesi de farklı değerler alacaktır. Uyarıcının tipik özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir [B&K Master Catalogue, 1989].

Tablo 4.6 B&K 4810 tip titreşim uyarıcının bazı teknik özellikleri

Parametre	Değeri
Frekans bölgesi	DC – 18 kHz
Uyguladığı kuvvet (tepe)	10 Newton
Maksimum ivmelenme (tepe)	550 ms ⁻²
Maksimum yer değiştirme (tepe-tepe)	6 mm
Hareketli kafanın dinamik ağırlığı	18 g
Maksimum akım girişi	1.8 A _{rms}
Bobin empedansı	3.5 Ω
Hareketli kafa boyutu	14 mm çap
Sıkıştırma vidasının ölçüsü	10-32 UNF

Sinyal Üretici : Pistonun hareketini sağlayan elektrik sinyali üreten kaynaktır. Ölçümler 20-250 Hz aralığında yapılacağından bu frekans bölgesinde elektrik sinyali üretebilmeli ve ölçümler süresince sinyalin frekansı ve genliği kararlı kalmalıdır. Bu gereksinimler dikkate alındığında sinyal üretici olarak Stanford Research System tarafından üretilen DS360 Model Düşük gürültülü sinyal üretici, tercih edilmiştir.

Güç Yükseltici : Sinyal üreticinin ürettiği sinyali kuvvetlendirerek titreşim uyarıcıya aktarır. Genellikle sinyal üreticilerin iki tip çıkış empedansları vardır. Bunlar 50 Ω ve yüksek empedans (High Z)'dir. Mekanik hareketi sağlayan titreşim uyarıcının giriş empedansı ise 3 Ω civarında olduğundan empedans uyum problemi vardır. Bu sinyal üreticiler titreşim uyarıcıları doğrudan sürmek için kullanılamazlar. Ölçüm düzeneğinde güç yükseltici olarak B&K 2706 tip cihaz kullanılmıştır. Güç yükselticinin tipik özellikleri Tablo 4.7'de verilmiştir [B&K Master Catalogue, 1989].

Tablo 4.7 B&K 2706 tip güç yükselticinin bazı teknik özellikleri

Parametre	Değeri
Frekans bölgesi	2 – 50 kHz
Akım limiti	5 ve 1.8 A
Güç çıkış	75 VA
Maksimum kazanç	40 dB
Zayıflatma	10-40 dB, 10 dB adım
Giriş empedansı	15 Ω
Çıkış empedansı	0.04 Ω
Çalıştırma gerilimi	110 veya 220 V AC

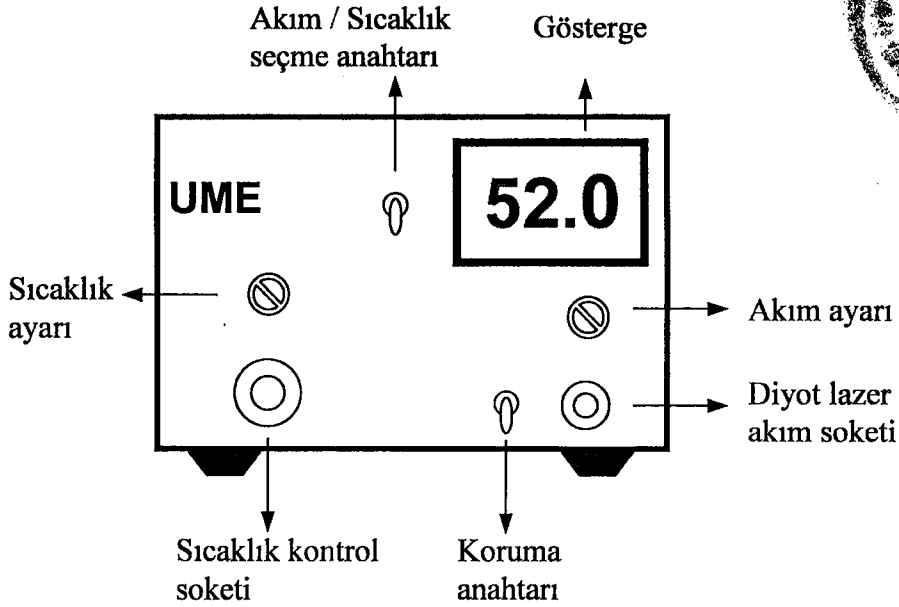
Lazerleri sürmek için kullanılan cihazlar:

Ölçme düzeneğinde lazerler, hareketli pistonun yer değiştirme değerini mutlak olarak belirlenmesinde kullanılmaktadırlar. İki tip lazer kullanılmıştır. Bunlardan birincisi Uniphase firmasının üretimi frekans kararlılığı olan 632.8 nm dalga boyuna

sahip He-Ne lazeridir. Bu lazer için üretici firmanın sağladığı sürücü kaynak haricinde başka bir ek cihaza ihtiyaç duyulmamıştır.

HL6501MG tip diyot lazerin kullanıldığı geri beslemeli tip dış kaviteli diyot lazer sisteminde ise özel sürücü devrelere ihtiyaç duyulmuştur. Diyot lazerin Şekil 4.10 ve Tablo 4.5'te verilen teknik özellikleri incelendiğinde seçilen lazer diyotun çalışması için gerekli olan akım en az 30 mA en fazla 75 mA'dır. Bu nedenle en azından 100 mA değerine kadar akım üreten kararlı bir akım kaynağına ihtiyaç duyulmuştur. Diyot lazerin yaydığı ışının dalga boyu, lazer diyotun dış gövde sıcaklığına bağlı olduğu için ayrıca sıcaklık kontrol devresine de ihtiyaç duyulmuştur. Diyot lazer sürme devresi UME özel ölçümler Laboratuvarı tarafından istenilen teknik özelliklere uygun olarak yapılmıştır. Akım kaynağı 0-100 mA bölgesinde 0.05 mA'den daha iyi kararlılık verecek kapasitesindedir. Lazere akım uygulama aşamasının başlangıcında ani yüklemeleri önlemek amacı ile koruma sağlanmıştır. Diyot lazerin çalışması sırasında dalga boyu kararlılığı için sıcaklık kontrol ünitesi PI (percentage-integration) tekniğine göre yapılmıştır. Sıcaklık kontrol sistemleri üzerinde yapılan çalışmalardan kazanılan tecrübelerle göre diyot lazerin çalışma sırasında dış gövde sıcaklığının ortam sıcaklığından daha düşük tercihen en az 1 °C altında olması sonucuna varılmıştır. Lazer pistonfon düzeneğinin kurulacağı UME Akustik ve Titreşim Laboratuvarı'nın ortam sıcaklığının değeri ve günlük değişim aralığı 23.0 ± 0.5 °C olacak şekilde düzenlenmiş olduğundan diyot lazerin dış kutu sıcaklığı en fazla 22 °C olmalıdır. Bu nedenle sistemin farklı sıcaklık değerindeki ortamlara kurulabileceği düşünülerek diyot lazerin dış kutu sıcaklığı ayarlanabilir şekilde yapılmıştır. Şekil 4.18'de UME' de yapılan dış kaviteli diyot lazerin akım kaynağı ve sıcaklık kontrol ünitesinin şematik çizimi verilmiştir.

Sıcaklık kontrolü için iki ayrı dönüştürücü kullanılmıştır. Bunlardan birisi, NTC sıcaklık kontrolünü sağlayan geri besleme devresinin çeviricisi, diğeri ise diyot lazerin sıcaklığını izlemek için kullanılan çeviricidir. Hassas mekanik ayar yapabilme imkanı için üzerine diyot lazerin ve optik elemanların bağlandığı malzeme fosfor bronzdan yapılmıştır.



Şekil 4.18. Diyot lazer için UME’de yapılan akım kaynağı ve sıcaklık kontrol ünitesi

Parametre ölçümünde kullanılanlar cihazlar :

Kapasitif mikrofonların basınç hassasiyet değerlerini belirlemek için ürettikleri gerilimi ve maruz kaldıkları ses basıncının bilinmesine gerek vardır. Gerilim ölçümleri için voltmetreye, ses basıncını yer değiştirme parametresini kullanarak belirlemek için her iki kanalındaki sinyalin frekanslar oranlarını ölçen oran sayıcı cihazlara ihtiyaç vardır. Ölçümler sırasında sinyallerin dalga şekillerinin izlenmesi için osiloskop, sinyalin frekans analizini yapabilmek için sinyal analizörlerine ihtiyaç vardır. Ölçümler sırasında sadece belirli bir frekanstaki sinyal ölçülmek ve değerlendirilmek istendiğinde ise bant geçiren filtreler gereklidir. Kısa kullanım amaçları verilen ve ölçümlerde kullanılan cihazlar şunlardır:

Sayısal Voltmetre : Mikrofon çıkış gerilimini ölçmek için gerilim ölçer olarak Datron 1271 Model Selfcal Digital Multimeter kullanılmıştır. AC gerilim ölçümlerindeki çözünürlüğü 6 1/2 dijittir. Ölçülen değerlerin istatistiksel değişimleri için çeşitli ortalama, blok ölçümler gibi parametreler vardır. Özellikle 1 kHz’in altındaki düşük frekanslı gerilim ölçümlerinde kullanılmak üzere 10, 40, 360 Hz gibi filtre fonksiyonları vardır. Bilgisayar kontrolü için IEEE 488 portu kullanılmıştır.



Frekans Sayıcı : Pistonun yer değiştirmesini belirlemek için, pistonun bir titreşim periyodu sırasında, detektör tarafından algılanan lazer ışınındaki pulsları ölçmek gerekecektir. Bunun için foto diyot tarafından üretilen sinyalin frekansının, piston titreşim frekansına oranı ölçülür. Bu ölçümler için HP 5316B tip Universal Counter kullanılmıştır. İki kanalı vardır. Oran ölçümlerinde titreşim uygulayıcıya uygulanan sinyal sayıcının B kanalına, foto diyottan gelen sinyal A kanalına uygulanmıştır. Ölçümler süresinde kapı süresi (gate time) 1 s olarak ayarlanmıştır. Bilgisayar kontrolü için IEEE 488 portu kullanılmıştır.

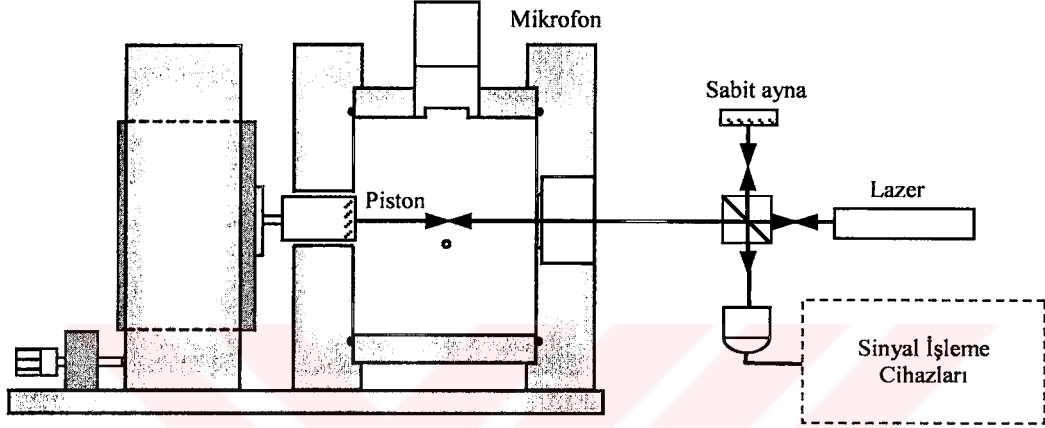
Osiloskop : Sinyal dalga şekillerini görmek için kullanılır. Özellikle enterferometrelerin ayarlanması sırasında ihtiyaç vardır. Elde edilen dalga şekillerinin kaydedilmesinde ve sinyal analiz çalışmalarında sayısal ve yazılım esaslı osiloskop kullanımı tercih edilir. Kullanılan osiloskop Agilent Infinium serisi 4 kanallı PC bazlı osiloskoptur.

Sinyal Analizörü : Lazer pistonun akustik bağlaşımı içerisinde üretilen ses basıncı, kalibre edilen mikrofon tarafından algılanarak ses sinyaline dönüştürülür. Ses basıncının, titreşen piston frekansında olup olmadığının kontrolü için frekans analizörü gereklidir. Bu amaçla B&K 2133 Tip Real Time Dual Channel Frequency Analyzer kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sırasında bağlaşım içerisinde üretilen ve mikrofon tarafından algılanan ses basıncının, gerçekten de piston titreşim frekansında olduğu gözlenmiştir.

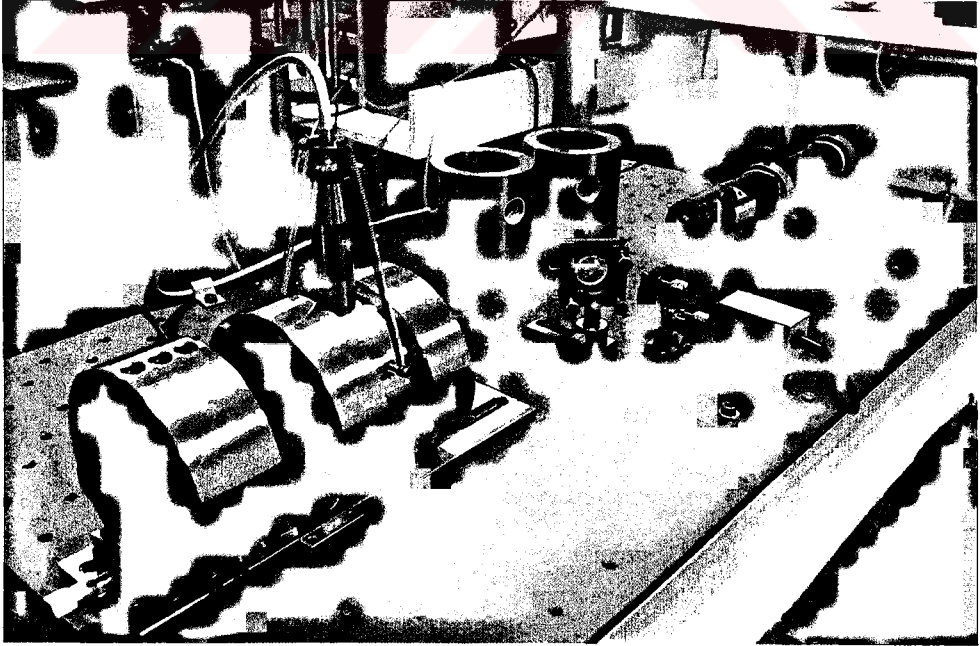
Bant Geçirgen Filtreler : Akustik alanında yapılan ölçümlerin sonuçları belirli frekans bantlarında verilir. Bu frekans bantlarının ve merkez frekansları, uluslararası standartlar organizasyonu (ISO) tarafından belirlenmiştir. Aynı parametrenin farklı cihaz, kiři, kurum gibi değişik şekillerde yapılan ölçüm sonuçlarının değerlendirilebilmesi ancak bu şekilde mümkün olmaktadır. En yaygın kullanılan 1/3 oktav frekans bandıdır. Mikrofonun ürettiği analog sinyaller, adı gečen bant geçirici filtreler kullanılarak değerlendirilir.

4.2. Ölçüm Düzeneginin Kurulması

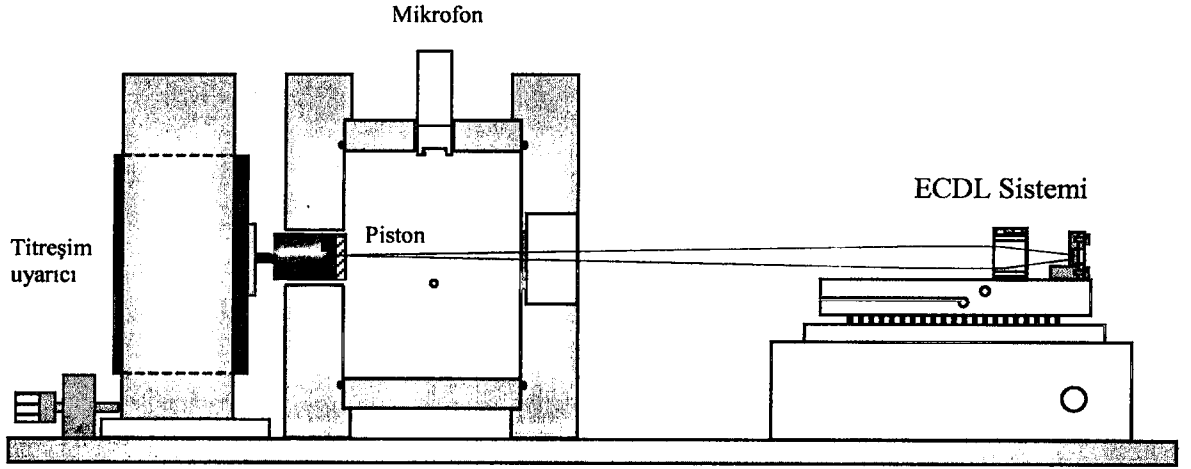
Dış kaviteli diyot lazer düzenegini kurmak için Bölüm 4.1.de anlatılan alt yapı elemanları bir araya oluşan getirildiğinde ölçüm düzeneklerinin şematik resimleri, lazer kaynağı olarak He-Ne kullanıldığında Şekil 4.19'da, diyot lazer kullanıldığında ise Şekil 4.20'deki gibi olur.



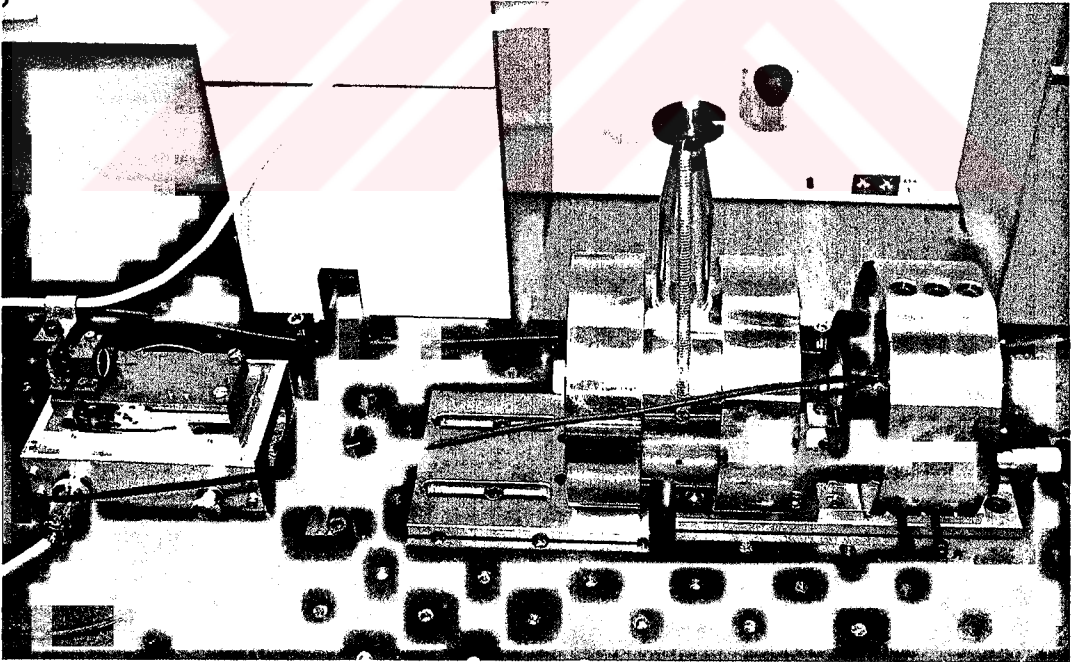
Şekil 4.19a. Lazer pistonfon ölçüm düzenegİ şematik çizimi, lazer kaynağı olarak He-Ne lazeri kullanılmaktadır.



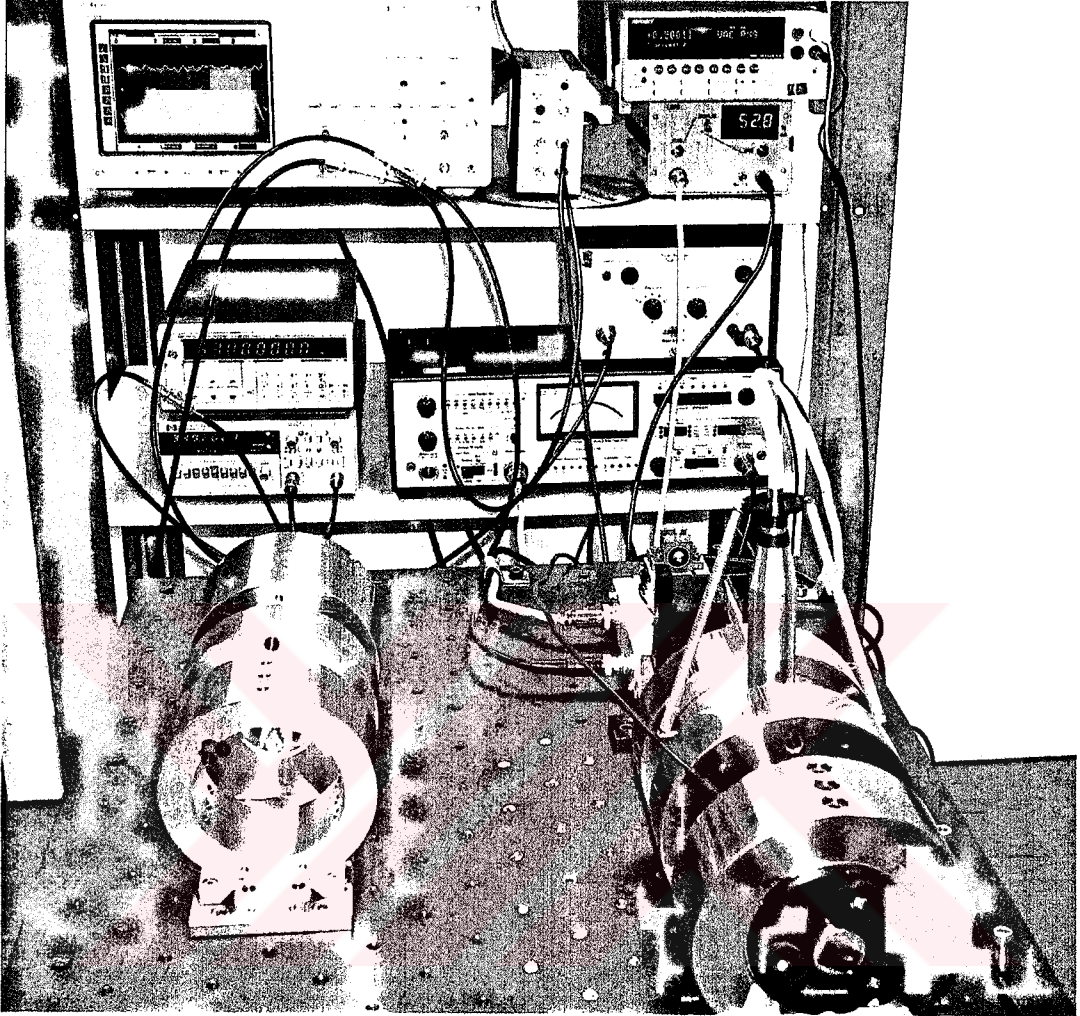
Şekil 4.19b. Lazer pistonfon ölçüm düzenegİ, lazer kaynağı olarak He-Ne lazeri kullanılmaktadır.



Şekil 4.20a. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği şematik çizimi, lazer kaynağı dış kaviteli diyet lazer (ECDL) kullanılmaktadır.



Şekil 4.20b. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği, lazer kaynağı olarak dış kaviteli diyet lazer (ECDL) kullanılmaktadır.

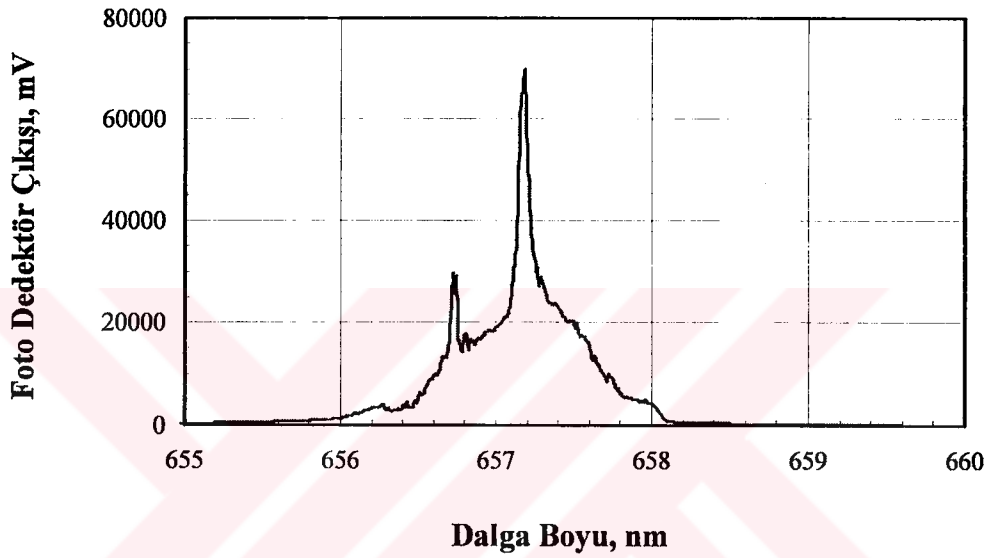


Şekil 4.20c. Lazer pistonfon ölçüm düzeneği ve ölçme cihazları, lazer kaynağı olarak dış kaviteli diyot lazer (ECDL) kullanılmaktadır

4.2.1. Diyot Lazerin Dalga Boyunun Belirlenmesi

Mikrofonların Şekil 4.20c'de verilen düzenek kullanılarak kalibrasyonlarının yapılabilmesi, diğer bir deyişle lazer pistonfon içerisindeki pistonun yer değiştirmesini belirleyebilmek için enterferometre düzeneğinde kullanılan lazerin dalga boyunun çalışma şartlarındaki değerinin belirlenmesi gereklidir. Bu kapsamda ECDL sisteminde kaynak ve alıcı özelliklerine sahip diyot lazeri, UME yapımı akım besleme ve sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak ve elektriksel gürültü değerleri de

dikkate alınarak 52 mA sürme akımında ve 22.0 °C'de çalıştırıldı. Tarama ölçümleri yapılarak ECDL içerisinde bulunan diyot lazerin dalga boyunun UME Optik laboratuvarı tarafından 657.18 nm olduğu belirlendi. Ölçüm sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir. Gerçektende 22.0 °C'de çalıştırılan diyot lazer için elde edilen bu değer, Şekil 4.10'da verilen kutu sıcaklığı-lazer dalga boyu grafiğinden bulunan 657 nm değeri ile uyumludur. Bu çalışma koşulları altında Şekil 4.10'daki grafiklerden diyot lazerin optik çıkış gücünün yaklaşık 5 mW olduğu görülür.

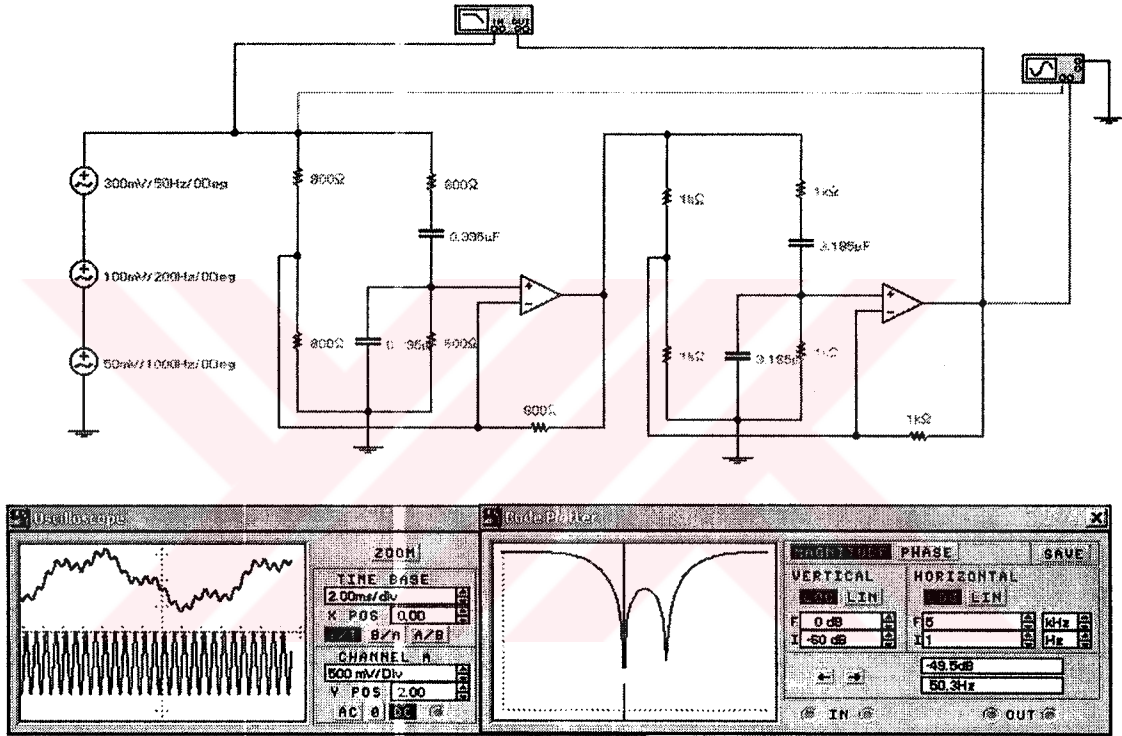


Şekil 4.21 22 °C sıcaklık ve 52 mA sürme akımında çalışan HL6501MG diyot lazerin dalga boyunun değişimi,

4.2.2. Dış Kaviteli Diyot Lazerde Optik Kısımın Ayarlanması

Diyot lazerin çıkış ışını bağlaşım içerisinde hareket eden pistonun yüzeyine odaklamak için odak mesafesi 6 mm olan teleskop sisteminden faydalanıldı. Harmonik hareket yapan piston yüzeyinden yansıyan lazer ışığı, gerekli optik ayarlar yapılarak ECDL içerisine geri dönmesi sağlandı. ECDL paketi içerisinde bulunan foto diyot ve sinyal yükselteci kullanılarak, pistonun hareketi sonucu oluşan girişim deseni sinyali algılandı. Bu aşamada elektriksel gürültülerin etkili olduğu gözlemlendi.

Oran sayıcı tarafından girişim deseni sinyalinin algılanabilmesi için yükseltilmiş foto diyot çıkış sinyalinin temiz (gürültüsüz) olması gereklidir. Foto diyot sinyalinin frekans analizi yapıldığında elektriksel gürültüyü 50 Hz ve harmoniklerinin oluşturduğu bulunmuştur. Devresi Şekil 4.22’de verilen ve bant atıcı anlamına gelen, iki katlı Notch filtresi yapılarak foto diyot sinyalinin gürültülerden temizlenmesi sağlandı.

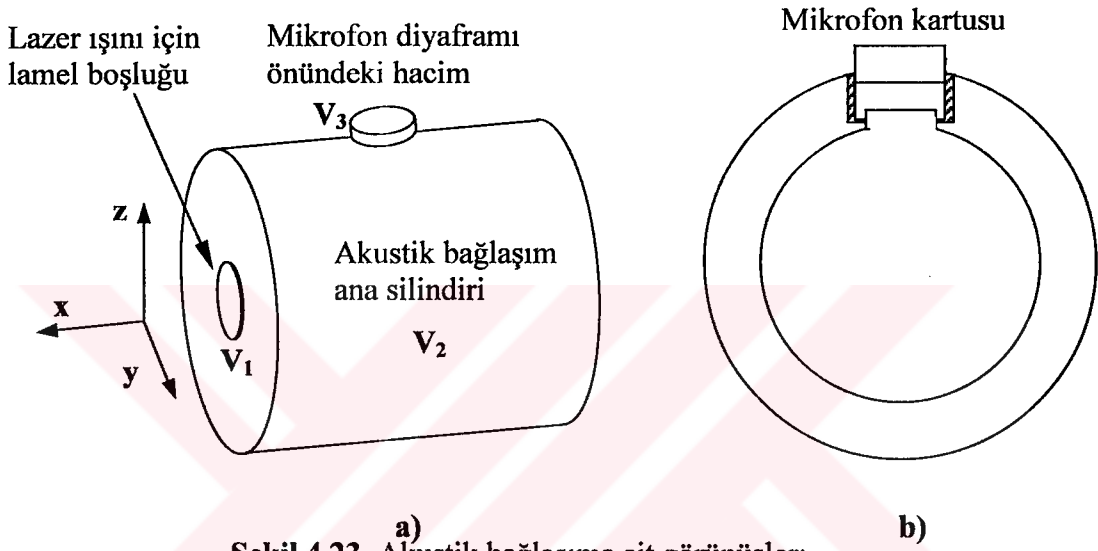


Şekil 4.22. Foto diyot çıkış sinyalindeki elektriksel gürültüleri süzmek için kullanılan Notch filtresi ve Bode diyagramı

Yukarıda devre şeması verilen filtrenin kullanılması ile dış kaviteli diyot lazerin optik ayarlaması ve pistonun yer değiştirmesini belirlemek için gerekli olan frekans oranları ölçümü mümkün olabilmektedir.

4.2.3. Akustik Bağlaşımların Hacimlerinin Hesaplanmaları

Mikrofonların lazer pistonfon için kullanılarak yapılan kalibrasyonları sırasında kullanılan akustik bağlaşımın hacmi mikrofon hassasiyetini doğrudan etkileyen parametrelerden birisidir. Bu nedenle akustik bağlaşımın hacmi hassas bir şekilde hesaplanmalıdır. Genel olarak ölçümlerde kullanılan bağlaşımların oluşturdukları hacimler Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Akustik bağlaşımın hacim hesaplamaları;

a) bağlaşım içinde oluşan hacim, b) mikrofon monte edilmiş akustik bağlaşımın kesit görünümü,

Akustik bağlaşımın toplam hacmi V_0 , Şekil 2a'da görüldüğü gibi üç ayrı geometrik yapıdan oluşmaktadır. Bunlar; enterferometrik düzenek için lazer ışınının geçtiği lamelin montajında kullanılan boşluk (V_1), akustik bağlaşım ana silindiri (V_2) ve mikrofonun takıldığı bölümdeki mikrofon ön hacmi ile onun önündeki boşluğun oluşturduğu silindirik yapıdır (V_3). Buradan

$$V_0 = V_1 + V_2 + V_3 \quad (4-4)$$

Nominal hacimleri 175 ve 340 cm³ olan iki adet akustik bağlaşım yapılmıştır. Bu bağlaşımların hacim hesabı aşağıda verilmiştir.

Büyük bağlaşımın hacminin hesabı (Nominal hacmi 340 cm³)

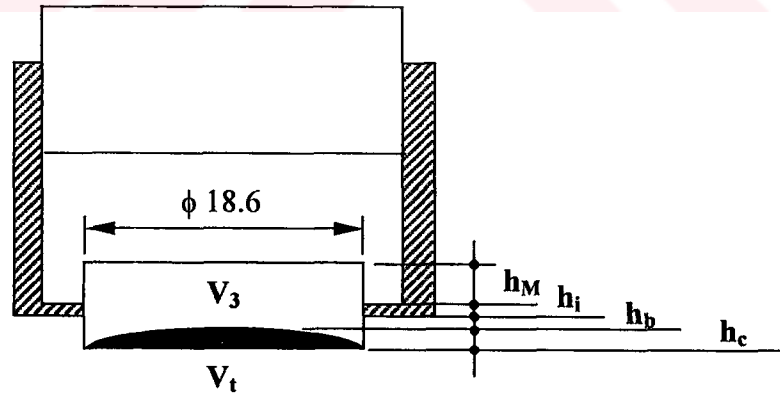
V_1 hacmi, yüksekliği 0.5 mm ve çapı 18.6 mm olan bir silindirik yapıdır. Buradan V_1 hacmi hesaplandığında;

$$V_1 = 135.8582 \text{ mm}^3$$

olarak bulunur. Benzer şekilde V_2 hacmi, yüksekliği 78.6519 mm ve çapı 74.3133 mm olan bir silindirik yapıdır. Hesaplama yapılırsa;

$$V_2 = 341139.6459 \text{ mm}^3$$

olarak bulunur. V_3 hacmi basit bir silindirik yapı değildir. Yarı çapları farklı iki silindirin biri birini dik olarak kesmesinden oluşan bu yapının kesit görünüşü Şekil 4.23b'de görüldüğü gibidir. Üstten bakıldığında ise daire olarak görülmektedir. V_3 hacmi detaylı olarak Şekil 4.24'te verilmektedir. 18.6 mm çapındaki mikrofon ön hacmi ile onun önündeki boşluğun oluşturduğu silindirik hacimden, çapı 74.3133 mm olan silindirin siyah boyalı kısım kadar bölümü çıkartıldığında V_3 hacmi elde edilecektir.



Şekil 4.24. Mikrofon ön hacmi ile onun önündeki boşluğun oluşturduğu V_3 hacmi

V_3 hacminin hesaplanmasında kullanılacak olan parametrelerin değerleri şöyledir:

h_M : Mikrofon ön hacim yüksekliği, 1.95 mm

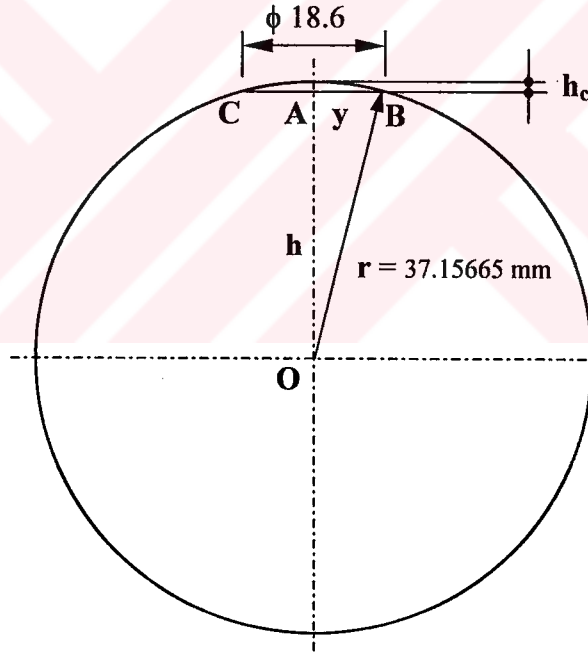
h_i : Mikrofon ile bağlaşım arasındaki izolasyon malzemenin kalınlığı, 0.5 mm,

h_b : İzolasyon malzemesinin tabanı ile bağlaşımın içi arasındaki mesafe, 0.5 mm,

h_c : V_t hacmine sahip geometrik yapının yüksekliği,

$$V_4 = V_3 + V_t \quad (4-5)$$

olarak tanımlansın. Diğer taraftan h_c yüksekliği bilinirse V_4 hacmi, yüksekliği $h_M + h_i + h_b + h_c$ ve çapı 18.6 mm olan silindirin hacmi olur. h_c yüksekliğinin bulmak için Şekil 4.25 kullanılabilir.



Şekil 4.25 Akustik bağlaşımın iç çapı ile h_c yüksekliği arasındaki ilişki

Şekil 4.25'teki AOB üçgeninde h yüksekliğini (AO doğru parçası) bulmak için Pisagor bağıntısı kullanılırsa

$$h = \sqrt{r^2 - y^2} = \sqrt{37.1567^2 - 9.3^2} = 35.9740 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Diğer taraftan h ve h_c nin toplamı r yarıçapını vereceğinden h_c yüksekliği

$$h_c = r - h = 37.1567 - 35.9740 = 1.1827 \text{ mm}$$

dir. h_c nin bulunması ile V_4 hacmi artık kolaylıkla bulunabilir. Bu hacmin yüksekliği $h_M + h_i + h_b + h_c$ ifadesinden 4.1327 mm ve çapı 18.6 mm olduğuna göre hesaplamalar yapıldığında V_4 hacmi aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_4 = 1122.9163 \text{ mm}^3$$

Akustik bağlaşımın toplam hacmini bulmak için son işlem olarak V_t hacminin belirlenmesine gerek vardır. Bu hacim, basit geometrik yapıda olmayıp değeri, V_t hacmini oluşturan S_x , S_y ve S_z yüzeylerinin belirli entegrasyonu ile hesaplanabilecek bir yapıdadır.

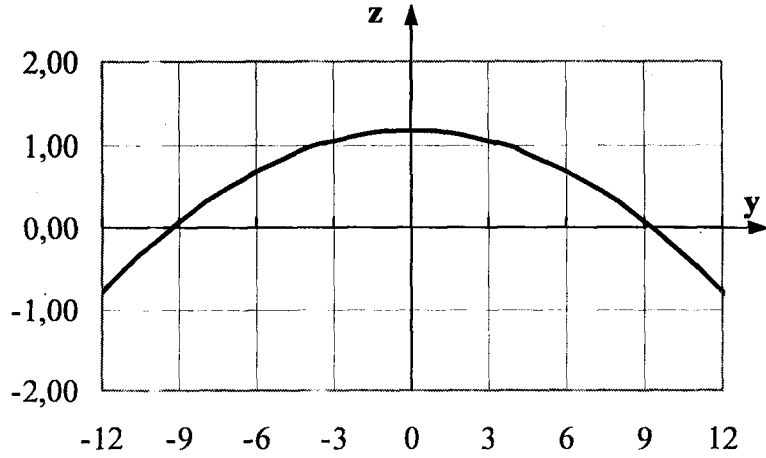
$$V_t = \iiint_{S_x S_y S_z} dz dy dx \quad (4-6)$$

S_z yüzeyi, akustik bağlaşımın içinde kalan bir yüzeydir. V_t hacmini sınırlandıran kısmı $z=0$ doğrusu ile $z = f(y)$ eğrisi altında kalan bölümdür. $z = f(y)$ eğrisi yaklaşık olarak Şekil 4.26'da verilen parabol ile ifade edilebilir. $z = f(z)$ fonksiyonunun tarif eden parabolün genel ifadesi $z = ay^2 + by + c$

ile verilir. Simetrik olması nedeniyle parabol ifadesinde $b = 0$ 'dır. $c=h_c=1.1827$ dir. $y = \pm 9.3$ sınır değerlerinde $z=0$ olacağından $a = -0.013674$ olarak bulunur. Böylece V_t hacminin integrasyon hesabı için S_z yüzeyine ait üst sınır değeri

$$z = -0.013674y^2 + 1.1827$$

ile verilir.



Şekil 4.26. Akustik bağlaşımın içinde x eksenı boyunca V_t hacmini yaklaşık olarak ifade eden , parabol.

V_t hacmine z ekseninden bakıldığında daire kesiti görülür. Dairenin çapı mikrofon diyaframına eşit olup değeri 18.6 mm'dir. Buna göre dairenin xy düzlemindeki (S_y) ifadesi

$$y = \sqrt{9.3^2 - x^2}$$

ile verilir. Daire y eksenı boyunca $\pm\sqrt{9.3^2 - x^2}$ aralığında değışir. V_t hacmine y ekseninden bakıldığında S_x düzlemi için $x_1 = -9.3$ ve $x_2 = 9.3$ arasında kalan bir doğru görülür. Bu veriler dikkate alınırsa V_t hacmi için

$$V_t = \int_{-9.3}^{9.3} \int_{-\sqrt{9.3^2 - x^2}}^{\sqrt{9.3^2 - x^2}} \int_0^{-0.013674x^2 + 1.1827} dz dy dx$$

ifadesi yazılabilir. Belirli integral için gerekli işlemler yapılrsa

$$V_t = 241.0156 \text{ mm}^3$$

olarak bulunur. V_t hacmi belirlendiğine göre V_3 dolayısıyla akustik bağlaşımın toplam hacmi olan V_o hesaplanabilir. Buradan;

$$V_3 = V_4 - V_t = 1122.9163 - 241.0156 = 881.9007 \text{ mm}^3$$

ve

$$V_o = V_1 + V_2 + V_3 = 135.8582 + 341139.6459 + 881.9007 = 342157.4048 \text{ mm}^3$$

veya

$$V_o = 342.1574048 \text{ cm}^3$$

olarak bulunur.

Küçük bağlaşımın hacminin hesabı (Nominal hacmi 175 cm³)

V_1 hacmi, yüksekliği 0.5 mm ve çapı 18.6 mm olan bir silindirik yapıdır. Buradan V_1 hacmi hesaplandığında;

$$V_1 = 135.8582 \text{ mm}^3$$

olarak bulunur. Benzer şekilde V_2 hacmi, yüksekliği 39.943 mm ve çapı 74.5874 mm olan bir silindirik yapıdır. Hesaplama yapılırsa

$$V_2 = 174526.5480 \text{ mm}^3$$

Nominal hacmi 175 cm³ olan akustik bağlaşımın mikrofon takılan bölümü (V_3 hacmini oluşturan kısım) 340 cm³ hacimli akustik bağlaşım ile aynı ölçülerde imal edilmiştir. Buna göre küçük bağlaşımın V_3 hacmi yaklaşık olarak

$$V_3 = 881.9007 \text{ mm}^3$$

Ve buradan da toplam hacmi

$$V_o = V_1 + V_2 + V_3 = 135.8582 + 174526.5480 + 881.9007 = 175544.3069 \text{ mm}^3$$

veya

$$V_o = 175.5443069 \text{ cm}^3 \text{ olarak bulunur.}$$

4.2.4. Basınç Hassasiyetini Etkileyen Parametreler

Polarizasyon Gerilimi: Kapasitif mikrofonun hassasiyeti yaklaşık olarak polarizasyon gerilimine doğru orantılı olarak bağlıdır. Bu nedenle ölçümler sırasında kullanılan polarizasyon gerilimi belirtilmelidir. IEC 61094-1 standardının şartlarına göre 200.0 V değerindeki polarizasyon geriliminin kullanılması gerekmektedir.

Topraklama Bağlantısı: Mikrofon açık devre gerilimi, eşdeğer gerilim yöntemi (insert voltage technique) kullanılarak ölçülmeli ve bu arada mikrofonun topraklama zırhı, toprak gerilimine bağlanmalıdır.

Mikrofon Diyaframı Üzerindeki Basınç Dağılımı: Basınç hassasiyetinin tanımı gereği, mikrofon diyaframı üzerindeki ses basıncının düzgün olarak dağıldığı varsayılmaktadır. Mikrofon, diyaframının merkezindeki ses basıncına daha fazla duyarlıdır. Bu nedenle, mikrofon diyaframı üzerinde aynı ortalama değere sahip düzensiz ve düzenli ses basınç dağılımına karşı gelen mikrofon çıkış gerilimleri birbirlerinden farklı olacaktır. Bu nedenle kalibrasyon yapılırken mikrofon diyaframı üzerindeki ses basınç dağılımının mikrofon 0.1 dB'den daha iyi olması önerilmektedir. Bağlaşım içerisinde oluşturulan ses basıncı, mikrofon diyaframı üzerinde homojen dağılım oluşturmalıdır. Koşulun sağlanabilmesi için dalga hareketinin temel teorisine göre bağlaşımın en büyük boyutu, lazer pistonfonun kullanılabileceği üst frekanstaki dalga boyunun 1/20'si kadar olmalıdır.

Ortam Şartları:

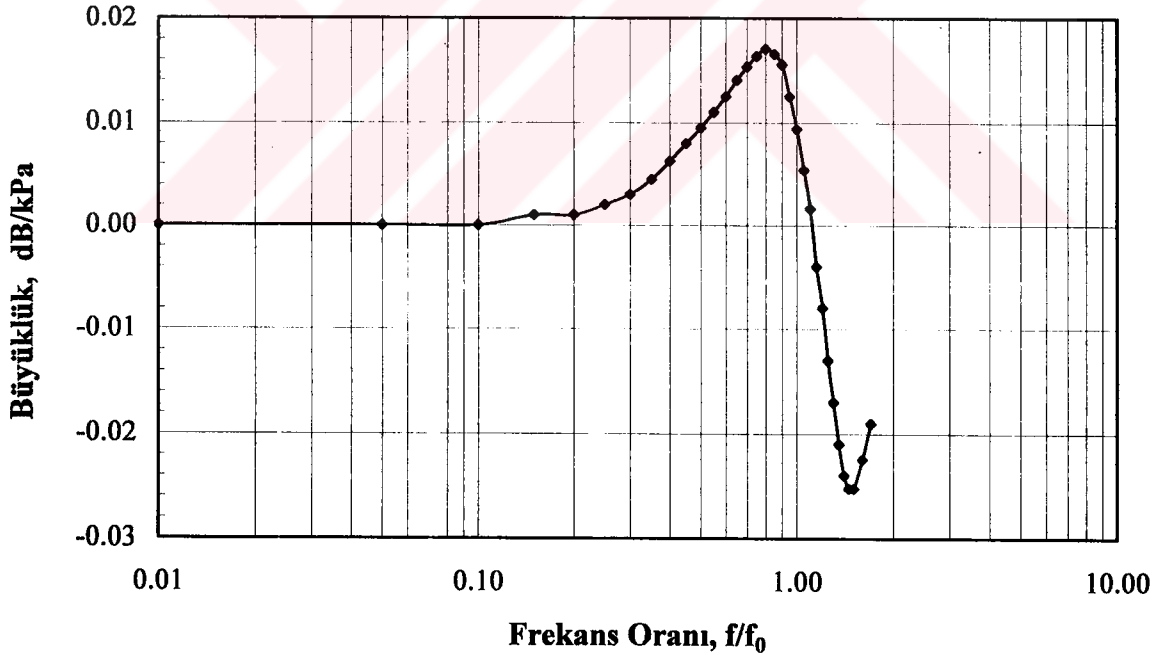
Ölçüm sonuçları beyan edilirken basınç hassasiyeti referans ortam şartlarına göre düzenlenmelidir. Bu, farklı zamanlarda ve farklı ortam koşullarında gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırmasını mümkün kılmaktadır.

Statik Basınç: Mikrofon diyaframı ve arka plaka arasındaki gazın kütlesi, diyaframın arkasındaki boşluğun uyumluluğu (compliance) ve dolayısıyla mikrofonun basınç hassasiyeti statik basınca bağlıdır. Bu bağımlılık frekansın bir

fonksiyonudur. 1" çapındaki B&K 4160 tip LS1P ve 1/2" çapındaki B&K 4180 tip LS2P laboratuvar standardı mikrofonların statik basınç katsayıları, düşük frekans basınç katsayısı ve rezonans frekansına göre normalize olarak belirlenmiştir [Rasmussen, 1999]. 1" çapındaki 4160 tip mikrofonların tipik rezonans frekansları 8100 Hz $\pm$ 500 Hz'tir. Her bir mikrofonun kendisine ait düşük frekans basınç katsayısı aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir.

$$\delta_p = -350 \times 10^{-6} \cdot M_{p,250} \text{ dB/V} \quad (4-7)$$

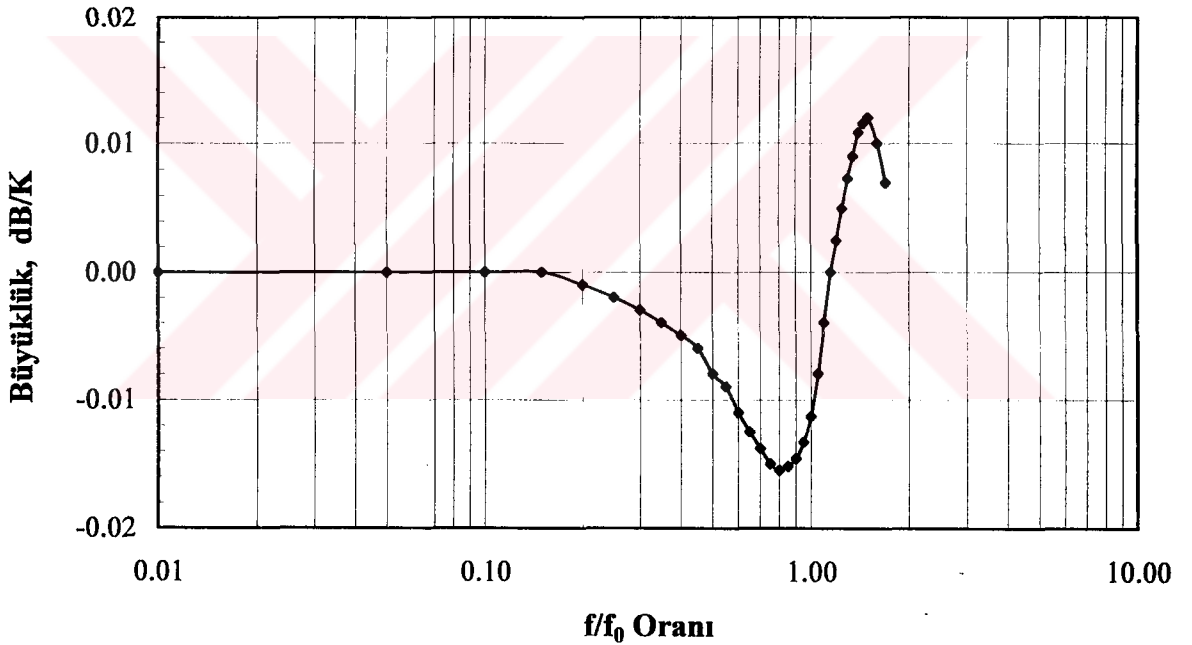
Burada $M_{p,250}$, mikrofonun 250 Hz'teki mV/Pa birimi cinsinden basınç hassasiyetidir. Kalibre edilmiş bir pistonfon kullanarak mikrofonun hassasiyeti belirlenebileceğinden frekans olarak 250 Hz seçilmiştir. Düşük frekans basınç katsayısına normalize edilmiş statik basınç katsayıları Tablo 4.8'de, bunların frekansa göre değişimi ise Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. B&K 4160 tip mikrofonun düşük frekans katsayısına normalize edilmiş statik basınç katsayılarının f/f_0 frekans oranına göre değişimi

Sıcaklık: Mikrofon diyaframı ve arka plaka arasındaki gazın kütlesi ve direncin her ikisi de sıcaklığa bağlı iken uyum'un (compliance) sıcaklıktan bağımsız olduğu

varsayılır. Mikrofonun kapalı bölümündeki havanın yanı sıra mikrofonu oluşturan mekanik parçalar da sıcaklıktan etkilenir. Esas olarak etki, mikrofon diyaframının gerginliğinde değişim dolayısı ile mikrofonun uyum'unda değişim olacaktır. Sıcaklık katsayısı, mikrofonun kapalı hacimdeki havanın empedansının değişimi ile mekanik gerginliğin değişim etkilerinin lineer bileşimi olarak ortaya çıkar. 1" çapındaki B&K 4160 tip LS1P ve 1/2" çapındaki B&K 4180 tip LS2P laboratuvar standardı mikrofonları için sıcaklık katsayıları belirlenmiştir [Rasmussen, 1999]. Her bir mikrofonun kendisine ait düşük frekans sıcaklık katsayıları için $\delta_t = -0,00247$ dB/K değeri kullanılabilir. 1" çapındaki 4160 tip mikrofonun normalize edilmiş sıcaklık katsayıları Tablo 4.8'de, bunların frekansa göre değişimi ise Şekil 4.28'da verilmiştir.



Şekil 4.28. B&K 4160 tip mikrofonun rezonans frekansına normalize edilmiş sıcaklık katsayılarının frekansa göre değişimi

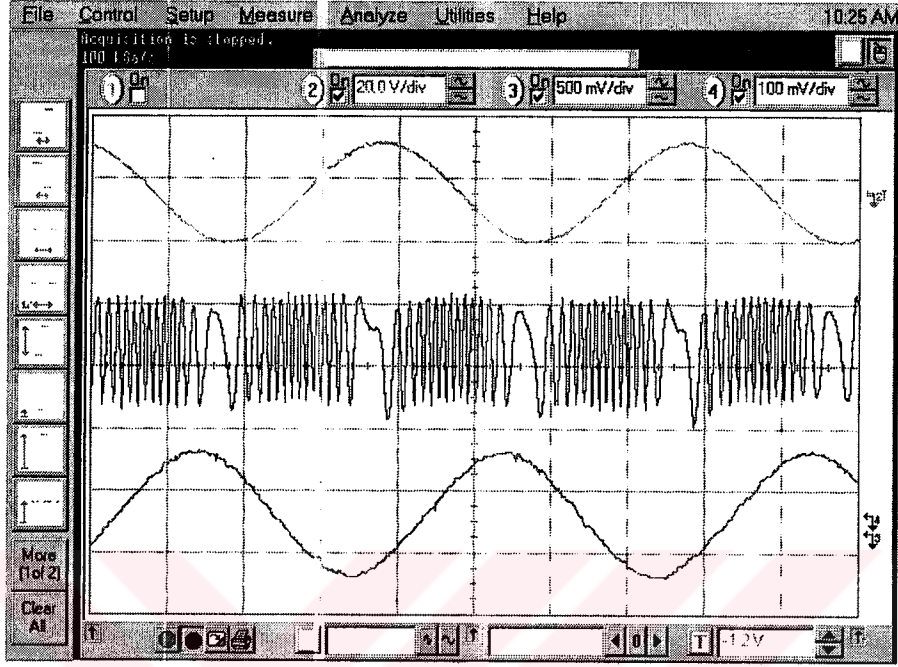
Nem: Nem etkisi detaylı olarak incelenmemiştir. Nem katsayısı, sıcaklık katsayısına benzer olacaktır. Ortam bağıl nemindeki % 30'luk değişim, ortam sıcaklığında 1 °C değişiklikle aynı miktarda hava yoğunluğunu değiştirir. Bu nedenle laboratuvar şartları altında yapılan ölçümler için nem etkisi ihmal edilebilir değerlerdedir [Rasmussen, 1999].

Tablo 4.8. B&K 4160 tip mikrofonların rezonans frekanslarına normalize edilmiş basınç ve sıcaklık katsayıları

Frekans Oranı	Normalize edilmiş Statik basınç katsayısı $\delta_p / (\text{dB/kPa})$	Normalize edilmiş Sıcaklık katsayısı $\delta_t / ((\text{dB/K}))$
0.01	0	0
0.05	0	0
0.10	0	0
0.15	0.0010	0
0.20	0.0010	-0.0010
0.25	0.0020	-0.0020
0.30	0.0030	-0.0030
0.35	0.0045	-0.0040
0.40	0.0063	-0.0050
0.45	0.0080	-0.0060
0.50	0.0095	-0.0080
0.55	0.0110	-0.0090
0.60	0.0125	-0.0110
0.65	0.0140	-0.0125
0.70	0.0153	-0.0138
0.75	0.0163	-0.0150
0.80	0.0170	-0.0155
0.85	0.0165	-0.0152
0.90	0.0155	-0.0146
0.95	0.0125	-0.0133
1.00	0.0094	-0.0113
1.05	0.0054	-0.0080
1.10	0.0016	-0.0040
1.15	-0.0040	0.0000
1.20	-0.0080	0.0025
1.25	-0.0130	0.0050
1.30	-0.0170	0.0073
1.35	-0.0210	0.0090
1.40	-0.0240	0.0108
1.45	-0.0253	0.0115
1.50	-0.0253	0.0120
1.60	-0.0225	0.0100
1.70	-0.0190	0.0070

Ölçümler 250 Hz'e kadar olan düşük frekanslarda 1/3 oktav bant merkez frekanslarında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm 99700 Pa dış ortam basıncı, 21.7 °C sıcaklık ve % 66.7 nem koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında pistonun hareketini sağlayan titreşim uyarıcıya uygulanan sinyal, pistonun hareketi sonucu ECDL paketi içerisinde bulunan foto diyot tarafından algılanan girişim

deseni sinyali ile kapalı bağlaşım içerisinde pistonun oluşturduğu ses basıncına karşılık mikrofona ürettiği gerilim sinyalinin dalga formu şekil 4.30'da verilmiştir.



şekil 4.30. Mikrofon kalibrasyonu sırasında gözlenen sinyallerin dalga şekilleri, *Üstte*, pistonun bağlı olduğu titreşim uyarıcıya uygulanan sinyal (250 Hz), *ortada*, girişim deseni sinyali (foto diyot tarafından algılanan sinyal), *altta*, kapalı bağlaşım içerisindeki hareket eden pistonun ürettiği ses basıncına karşılık mikrofona terminallerinde oluşan gerilimin dalga şekli.

Lazer pistonfonun kapalı bağlaşım içerisinde pistonun hareketi ile oluşan yer değiştirme ile orantılı olan oran frekansı frekans sayıcı ile ölçüldü. Pistonun yer değiştirmesi Eşitlik (4-2) kullanılarak belirlendi. Burada hesaplanan yer değiştirmesi pistonun genlik değeridir. (Hassasiyet hesaplamalarında mikrofon çıkış gerilimi etkin değer (RMS) olarak ölçüldüğünden eşitlik (4-2) ile hesaplanan yer değiştirme değeri $\sqrt{2}$ 'ye bölünmüştür). Bağlaşım içerisindeki ses basıncı ise Eşitlik (3-17b) kullanılarak hesaplandı. Kapalı bağlaşım içerisindeki ses basıncına maruz kalan mikrofona elektriksel terminallerinde oluşan bu gerilim sayısal voltmetre ile hassas olarak ölçüldü. Ölçülen ve hesaplanan değerler kullanılarak kapalı bağlaşımda bulunan mikrofona basınç hassasiyeti aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplandı.

$$M_p = \frac{V}{p}; (mV / Pa)$$



Ölçümlerin yapıldığı ortam şartları dikkate alınarak hesaplanan hassasiyet ifadesi referans koşullara düzeltilmiştir. Yapılan düzeltme terimleri ile ölçüm koşulları altındaki hesaplanan düzeltme terimleri şöyledir :

Kılcal Boru Düzeltmesi; lazer pistonfonun akustik bağlaşımı içerisindeki basıncın dış ortam basınç değerini dengeleyebilmek için kullanılan ince kılcal boruların ölçüm sistemine etkisidir. Düzeltme değerleri EKA'da verilen ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.9. Ölçümlerin yapıldığı ortam şartlarında kılcal boru düzeltme teriminin frekansa bağlı değerleri

Frekans Hz	Re(Z _{ac}) GPa s/m ³	Im(Z _{ac}) GPa s/m ³	Mutlak(Z _{ac}) GPa s/m ³	Z _{cmik} MPa s/m ³	Kılcal Boru Düzeltmesi dB
20	3.018	0.097	3.020	3.25	0.009
25	3.019	0.122	3.021	2.60	0.007
31.5	3.02	0.153	3.024	2.06	0.006
40	3.022	0.195	3.028	1.62	0.005
50	3.025	0.244	3.035	1.30	0.004
63	3.029	0.307	3.045	1.03	0.003
80	3.036	0.390	3.061	0.812	0.002
100	3.047	0.488	3.086	0.649	0.002
125	3.063	0.610	3.123	0.519	0.001
160	3.093	0.782	3.190	0.406	0.001
200	3.137	0.980	3.287	0.325	0.001
250	3.207	1.228	3.434	0.260	0.001

Ölçümlerin yapıldığı ortam şartları ve lazer pistonfon bağlaşımı ve piston boyutları aşağıdaki gibidir ;

Basınç = 99700 Pa

Sıcaklık = 21.7 ° C

Nem = % 66.2

Piston çapı = 0.01834 m

Piston uzunluğu = 0.0324 m

Bağlaşım uzunluğu = 0.07865 m

Bağlaşım çapı = 0.07431 m

Bağlaşım hacmi = 0.00034216 m³

Bağlaşım yüzeyi = 0.027273 m²

Yukarıdaki veriler ve EKA'da verilen ifadeler kullanılarak ısı iletimi düzeltmesinin terimi hesaplanmıştır. Buna göre; D1= 0.3927563 ve D2= - 0.0343832 olarak bulunur. Isı iletimi düzeltme terimleri Tablo 4.10'da verilmiştir.

Farklı ortam koşullarında gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarını birbirleriyle karşılaştırmak için her ölçüm şartında elde edilen değerler referans ortam koşullarına düzeltilir. Ortam basıncı düzeltmesi ΔL_{P_s} için

$$\Delta L_{P_s} = 20 \log \left(\frac{P_r}{P_s} \right) \quad (4-9)$$

ifadesi kullanıldı. Burada P_s , ölçümlerin yapıldığı ortam basıncı, $P_r = 101325$ Pa değerinde olan referans basınç değeridir. Bölüm 4.2.1'de verilen mikrofonun basınç hassasiyetini etkileyen parametrelerden basınç düzeltmesi hesaplarında 0.0152 dB/kPa katsayısı kullanılmıştır. Mikrofon basınç düzeltme terimi ΔL_{P_M} nin hesaplanmasında aşağıdaki ifade kullanılmıştır.

$$\Delta L_{P_M} = \frac{(P_s - P_r) * 0.0152}{1000} \quad (4-10)$$

Sıcaklık düzeltmesi hesaplarında $-0.002 \text{ dB/}^{\circ}\text{C}$ katsayısı kullanılmıştır. Mikrofon basınç düzeltme terimi ΔL_{T_M} nin hesaplanmasında aşağıdaki ifade kullanılmıştır.

$$\Delta L_{T_M} = (t_r - t_s) * (-0.002) \quad (4-11)$$

Burada t_s , ölçümlerin yapıldığı ortam basıncı, $t_r = 23.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ değerinde olan referans sıcaklık değeridir.

% 30-70 aralığındaki ortam nem değerlerinin basınç hassasiyeti üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeylerde olduğu için nem etkisi dikkate alınmamıştır.

Mikrofon basınç hassasiyetinin ortam şartlarına göre düzeltilmesi için kullanılan düzeltme terimleri Tablo 4.11'de verilmiştir. Tüm ölçümler ve hesaplamaların sonucunda 1" boyutundaki LS1P mikrofonunun basınç hassasiyeti hesaplamaları Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.10. Ölçümlerin yapıldığı ortam şartlarında ısı iletimi düzeltme teriminin frekansa bağlı değerleri

Frekans Hz	X	Re(Ev)	Im(Ev)	Mutlak(Ev)	Isı İletimi Düzeltilme Terimi dB
10	53.5	0.96144	0.03740	0.96217	0.047
12.5	66.9	0.96551	0.03356	0.96610	0.042
16	85.6	0.96952	0.02976	0.96997	0.037
20	107.0	0.97273	0.02669	0.97310	0.034
25	133.8	0.97561	0.02392	0.97591	0.030
31.5	168.6	0.97827	0.02136	0.97851	0.027
40	214.1	0.98072	0.01899	0.98090	0.024
50	267.6	0.98275	0.01701	0.98290	0.021
63	337.1	0.98464	0.01518	0.98475	0.019
80	428.1	0.98637	0.01349	0.98646	0.017
100	535.1	0.98781	0.01208	0.98788	0.015
125	668.9	0.98909	0.01081	0.98915	0.013
160	856.2	0.99036	0.00957	0.99041	0.012
200	1070.3	0.99138	0.00856	0.99141	0.011
250	1337.8	0.99229	0.00767	0.99232	0.010

Tablo 4.11. Mikrofon basınç hassasiyetinin ortam şartlarına göre düzeltilmesi için kullanılan düzeltme terimleri

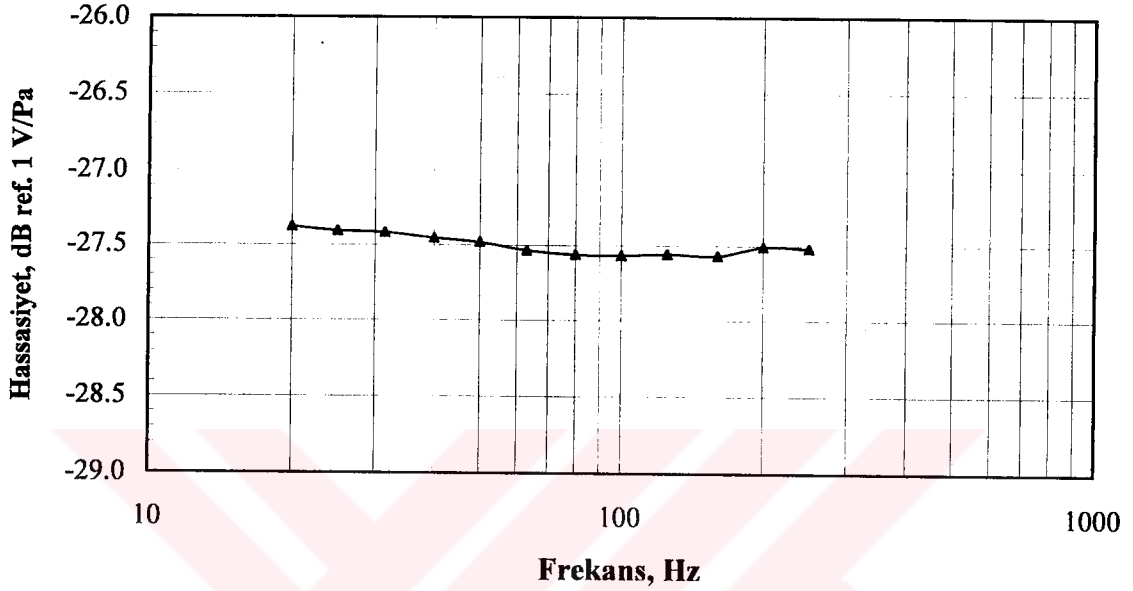
Frekans (Hz)	Kılcal Boru Düzeltilmesi (dB)	Isı İletimi Düzeltilmesi (dB)	Ortam Basıncı Düzeltilme (dB)	Mikrofonun Basıncı Düzeltilmesi (dB)	Mikrofonun Ortam Sıcaklığı Düzeltilmesi (dB)	Düzeltilmeler Toplamı (dB)
20	0.009	0.034	0.140	-0.025	-0.003	0.156
25	0.007	0.030	0.140	-0.025	-0.003	0.150
31.5	0.006	0.027	0.140	-0.025	-0.003	0.145
40	0.005	0.024	0.140	-0.025	-0.003	0.141
50	0.004	0.021	0.140	-0.025	-0.003	0.138
63	0.003	0.019	0.140	-0.025	-0.003	0.135
80	0.002	0.017	0.140	-0.025	-0.003	0.132
100	0.002	0.015	0.140	-0.025	-0.003	0.130
125	0.001	0.013	0.140	-0.025	-0.003	0.128
160	0.001	0.012	0.140	-0.025	-0.003	0.126
200	0.001	0.011	0.140	-0.025	-0.003	0.124
250	0.001	0.010	0.140	-0.025	-0.003	0.123



Tablo 4.12. LSIP tip kapasitif mikrofonun kalibrasyonu sırasında ölçülen değerler ve basınç hassasiyetinin hesaplanması

Frekans Hz	Ölçülen Oran Frekansı	Mikrofon Çıkış Gerilimi (mV)	Hesaplanan Yer değiştirme (μm)	Hesaplanan Ses Basıncı (Pa)	Hesaplanan Ses Basınç Düzeyi (dB) ref. 20 μPa	Hesaplanan Hassasiyet (mV/Pa)	Hesaplanan Hassasiyet (dB) ref. 1 V/Pa	Düzeltilmeler Toplamı (dB)	Düzeltilmiş Hassasiyet (dB) ref. 1 V/Pa
25	293.55	77.24	17.0	1.838	99.266	42.02	-27.532	0.150	-27.38
31.5	243.98	64.10	14.0	1.528	97.661	41.96	-27.544	0.145	-27.40
40	286.74	74.57	17.0	1.796	99.064	41.53	-27.633	0.141	-27.49
50	259.02	67.23	15.0	1.622	98.181	41.44	-27.651	0.138	-27.51
63	200.33	51.81	12.0	1.255	95.949	41.29	-27.682	0.135	-27.55
80	160.55	41.25	9.3	1.005	94.026	41.03	-27.738	0.132	-27.61
100	161.20	41.45	9.4	1.009	94.061	41.06	-27.732	0.130	-27.60
125	163.43	42.03	9.5	1.024	94.181	41.07	-27.731	0.128	-27.60
160	163.62	42.00	9.5	1.025	94.191	40.99	-27.747	0.126	-27.62
200	164.46	42.77	9.6	1.030	94.236	41.52	-27.634	0.124	-27.51
250	162.76	42.63	9.56	1.019	94.145	41.83	-27.571	0.123	-27.45

Mikrofonların dış kaviteli diyot lazer kullanarak kalibrasyonları için çok sayıda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak B&K 4160 tip mikrofonun kalibrasyonları yapılmıştır. Bu mikrofonun 20-250 Hz frekans aralığındaki basınç hassasiyeti değerleri Şekil 4.31 'de verilmiştir.



Şekil 4.31. B&K 4160 tip mikrofonun dış kaviteli diyot lazer ile gerçekleştiren kalibrasyonundan elde edilen basınç hassasiyetinin frekansa göre değişimi

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mikrofonların 20–250 Hz aralığındaki birincil kalibrasyonlarının yapılabilmesi için dış kaviteli diyet lazer esasına göre çalışan pistonfon tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Frekans ve seviyesi ayarlanabilen bir ses kaynağı, farklı çaplı mikrofonların birincil kalibrasyonları ve faz ölçümleri gibi çok fonksiyonu olan lazer pistonfon, düşük frekanslardaki izlenebilirlik zincirini oluşturacaktır.

Lazer pistonfonun çalışması sırasında akustik bağlaşım içerisinde üretilen ses basıncının kararlı olabilmesi için titreşim uyarıcının pistona yeterince kuvvet aktarabilmesi ve sonucunda da pistonun bağlaşım içerisinde düzgün harmonik hareket etmesi gereklidir. Bu nedenle kalibrasyonlarda bağlaşım içerisinde üretilen ses basınç düzeyi 90 dB'den daha büyük tutulmuştur.

Lazer pistonfon yöntemi ile mikrofonların mutlak kalibrasyonlarının tüm kalibrasyon belirsizliğine katkıda bulunan parametreler ve değerleri incelenmiştir. Yer değiştirme ölçümlerinden 0.01 dB, akustik bağlaşımın hacminin belirlenmesinden 0.008 dB ve pistonun çapının belirlenmesinden 0.006 dB değerlerinde katkı gelmektedir. Bağlaşım içerisindeki basınç dağılım düzensizliği, gerilim ölçümlerinin tekrarlanabilirliği ve mikrofon hassasiyetine yapılan düzeltmelerin etkileri, mikrofonların lazer pistonfon ile 20-250 Hz aralığındaki mutlak kalibrasyonlarında 0.05– 0.15 dB aralığında genişletilmiş belirsizlik oluşturmaktadır.

Lazer pistonfon ve karşılıklı kalibrasyon yöntemlerin frekans bölgeleri düşük frekans bölgelerinde üst üste bindiklerinden, bu iki yöntem ile kalibre edilen mikrofonun hassasiyet değerleri, lazer pistonfonun doğru çalıştığının bir göstergesi olmuştur. Hassasiyet değerlerinin 20-250 Hz aralığında gerçekleştirilen karşılaştırması, sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğunu göstermiştir. Her iki yöntem ile gerçekleştirilen kalibrasyonlar sonucunda hassasiyet değerleri arasındaki

farık 0.04 dB'yi geçmemektedir. Bu değerler her iki yöntemin kalibrasyon belirsizliği içerisinde. Lazer pistonfonun karşılıklı kalibrasyonu gibi klasikleşmiş birincil kalibrasyon yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyonların doğruluk seviyesindeki mutlak kalibrasyonlarda kullanılabileceği gösterilmiştir. Lazer pistonfon düşük frekans bölgesinde kullanılabilir alternatif ve etkin bir araçtır. Kısıtlı kalibrasyon bölgesi yöntemin ana dezavantajıdır, fakat karşılıklı kalibrasyon tekniğine göre ses basınç dinamik bölgesinin geniş olması, deney düzeneğinin basit ve kompakt oluşu, dış kaviteli diyot lazer esaslı lazer pistonfonu diğer eşdeğer yöntemler arasında önemli yer tutmasını sağlamaktadır.



KAYNAKLAR

1. ARNOLD H. D. and CRANDAL I. B., The Thermophone as as precision source of sound. Phys. Rev. 10, 22-38, 1917
2. BALLANTINE S., Technique of Microphone Calibration, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 3, No. 3 pp. 319-360, 1932.
3. BARHAM R.G., The NPL Laser Pistonphone, J.Low Freq. Noise & Vibration, vol. 12, No.2 pp. 36-38, 1993.
4. BERANEK L.L., Acoustic Measurements, John Willey & Sons,Inc., New York, p.49, 1949
5. BRÜEL P.V.-I, The accuracy of condenser microphone calibration methods, Part I, Selected Repirints from Technical Review : Measuring Microphones, 62 –88, 1965.
6. BRÜEL P.V.-II, The accuracy of condenser microphone calibration methods, Part II, Selected Repirints from Technical Review : Measuring Microphones, 89 – 112. 1965.
7. B&K Electronic Instruments Master Catalogue, 1989
8. CROCKER M.J., Handbook of Acoustic, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, NewYork,1998.
9. DONATI S., FALZONI L., MERLO S., A PC-Interfaced, Compact Laser-Diode Feedback Interferometer for Displacement Measurements IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 45(6) :942-947, 1996.

10. DONATI S., GIULIANI G., MERLO S., Laser Diode Feedback Interferometer for Measurement of Displacements Without Ambiguity, IEEE Journal of Quantum Electronics, 31(1) :113-119, 1995.

11. DONATI S., MERLO S., Application of Diode Laser Feedback Interferometry, Journal of Optics, Vol .29: 156-161, 1998.

12. GAGNON E., RIVEST JF., Laser range imaging using the self-mixing effect in a laser diode, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 48(3): 693-699, 1999.

13. GAMIDOV R., SADIKHOV E., CETINTAS M., Optical Feedback in Diode Laser for Sound Pressure Measurement, Third International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, Enrico Primo Tomasini, Editor, Proceeding of SPIE, 3411: 624-629, 1998.

14. GIACOMO, P., Equation for the determination of the density of moist air, (1981), Metrologia 18, pp. 33-40, 1982

15. HARRIS, C.M., Effect of humidity on the velocity of sound in air, J. Acoust. Soc. Am. 49, pp. 890-893, 1971

16. HL6501MG Visible High Power Laser Diode, ADE-208-515F (Z) Preliminary 7th Edition February, 1998

17. IEC Publication 61094-2, Measurement Microphones, Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique. 1992.

18. Instruction Manual, Condenser Microphones, One -inch Type 4160 and Half-inch Type 4180, Revision May 1991, Nearum, Denmark.



19. JARVIS D.R., Realisation of Sound Pressure through the Calibration of Half-inch lab. Standard Condenser Microphones, Phd. Thesis, Kings College (University of London), November, 1989
20. KIKUTA H., IWATA K., Nagata R., Distance Measurement by the Wavelength Shift of Laser Diode Light, Applied Optics, 25(17): 2976-2980, 1986.
21. KOBAYASHI T., SHUDONG J., Optical FM Heterodyne Interferometry for Range and Displacement Measurements, PEM 88 Digest.
22. KONKOV N.V., KUZNETSOV S.V., POLIKARPOV A.M., Calibration of Acoustical Measuring Instruments, VISM, Moscow, 1982.
23. LOPASHEV D.Z., KONIKOV A.V., MASYUKOV V.T., Primary State Standard for Unit Sound Pressure in Air, Measurement Techniques, Vol. 17 p.981-984, 1974.
24. MacGILIVRAY T., CAMPBELL D., GREATER C. and BARHAM R., The development of a Microphone Calibration Technique using Laser Doppler Anemometry, Acta Acustica, Vol 88, pp 135-141, 2002
25. Microphone Handbook, Vol: 1, sayfa 2.57, Brüel&Kjaer Master Catalogue CD, 1999
26. RASMUSSEN K., The static pressure and temperature coefficients of laboratory standard microphones, Metrologia, 36, No: 4, pp 265-273, 1999
27. RENNIE AJ, A Laser Pistonphone for Absolute Calibration of Laboratory Standards Microphones in the Frequency Range 0,1 Hz to 100 Hz, NPL Acoustics Report Ac 82, 1977
28. ROSS P.A., STEPHENS M., and WIEMANN C.E., Laser Vibrometer Based on Optical-Feedback-Induced Frequency Modulation of a Single-Mode Laser Diode, Applied Optics, 35(34) : 6754-6761, 1996.

29. TAKAHASHI H., MASUDA C., GOTOH Y., KOYAMA J., Laser Diode Interferometer for Vibration and Sound Pressure Measurements, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 38(2): 584-587, 1988.
30. TAYLOR K. J., Absolute Calibration of Microphones by a Laser-Doppler Technique, J. Acoust. Soc. Am. 70(4), p. 939-945, October, 1981
31. WENTE E. C., A condenser transmitter as a uniformly sensitive instrument for the absolute measurement of sound intensity. Phys. Rev. 10, 39-63, 1917.





ÖZGEÇMİŞ

1966 yılında Polatlı, Ankara'da doğdu. Evli ve iki kız çocuğu babasıdır. İlk, orta ve lise öğrenimini Polatlı'da tamamladı. 1983 yılında girdiği Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümünden 1988 yılında mezun oldu. 1989-1991 yılları arasında Türk Hava Kurumu Türkkuşu Genel Müdürlüğü'nde Bakım Mühendisi olarak çalıştı. Yüksek Lisans programını Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde ultrasonik güç ölçüm yöntemleri konusunda 1993 yılında tamamladı. 1994-1996 yılları arasında askerlik görevini yedek subay olarak yerine getirdi. 1991 Mayıs ayından itibaren TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Akustik Standartları Laboratuvarında Araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Türk Akustik Derneği TAKDER'e üye olup çeşitli dönemlerde Denetleme Kurulu ve Yönetim Kurulu üyeliği görevlerinde bulunmuştur. 2003 yılında Kalite Derneği'nin Kalibrasyon ve Ölçüm Uzmanlar grubunda çalışmalar yapmıştır. Akustik, ultrasonik ve titreşim standartları ve uygulamaları konularında, çeşitli dergi ve konferanslarda sunulmuş 30 adet bilimsel yayını bulunmaktadır.

EKA-1. Kapalı Bağlaşımlar İçerisinde Isı İletimi

Akustik transfer empedansının belirlenmesinde akustik bağlaşım içerisindeki gazın adyabatik şartlara uygun davrandığı kabul edilmiştir. Ancak pratikte küçük bağlaşımlar ve düşük frekanslar için bağlaşımın duvarlarındaki ısı transferinin etkisi adyabatik şartlardan uzaklaşmaya neden olmaktadır. Kapalı bağlaşım içerisinde bağlaşımın duvarları ve hava arasındaki ısı iletimi aşamalı olarak adyabatik şartlardan izotermal şartlara geçilmesine neden olur. Bu geçiş doğal olarak kalibrasyon frekansına ve bağlaşımın boyutlarına bağlıdır. Sabit hacim yer değiştirmesi yapan kaynağın (karşılıklı kalibrasyonu için verici mikrofon) oluşturduğu ses basıncı buna bağlı olarak değişecektir. Bu etki bağlaşım hacminde artış olarak değerlendirilir.

Yapısı basit ve duvarları sabit sıcaklıkta tutulan bir bağlaşım için ısı transfer kayıplarının etkileri hesaplanabilir ve geometrik hacim V_0 veya kesit alanı S_0 'a uygulanan kompleks düzeltme faktörü Δ_H terimi cinsinden ifade edilir.

$$\Delta_H = \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1)E_v} \quad (\text{EKA-1})$$

Burada E_v , ses basıncı ile birlikte sinüsel sıcaklık değişiminin uzaysal ortalamasının, bağlaşımın duvarlarının mükemmel yalıtıcı olması durumunda oluşabilecek sinüsel sıcaklık değişimine oranı olarak tanımlanan kompleks sıcaklık transfer fonksiyonudur.

$$E_v = 1 - S + D_1 S^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 S^3 \quad (\text{EKA-2})$$

$$S = \sqrt{-j \frac{1}{2\pi X}} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}} \quad (\text{EKA-3})$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2} \quad (\text{EKA-4})$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R + 1)^3} \quad (\text{EKA-5})$$

E_v kompleks sıcaklık transfer fonksiyonu ifadesinde geçen parametreler şunlardır:

R : Bağlaşımın uzunluğunun çapına oranı;

X = $f \ell^2 / (\kappa \alpha_t)$ olarak tanımlanan bir terim

f : kalibrasyonun yapıldığı frekans, Hz;

ℓ : Bağlaşımın hacminin yüzey alanına oranı, m;

α_t : Isıl dağılkanlık, m^2/s .

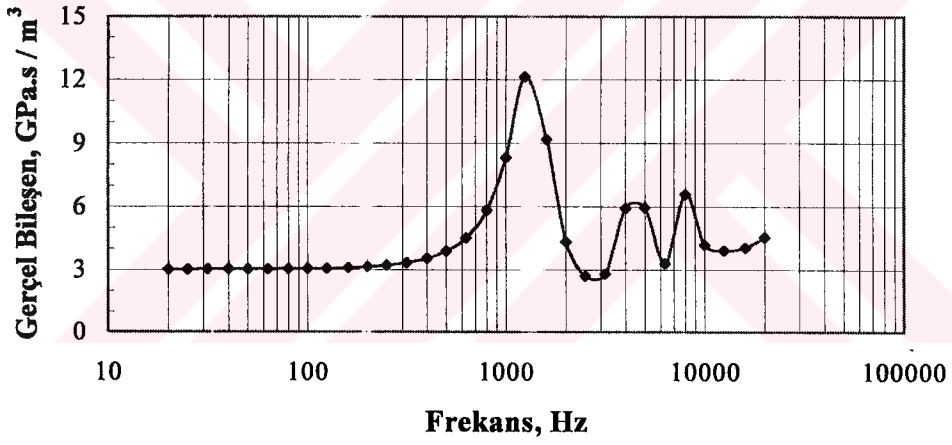
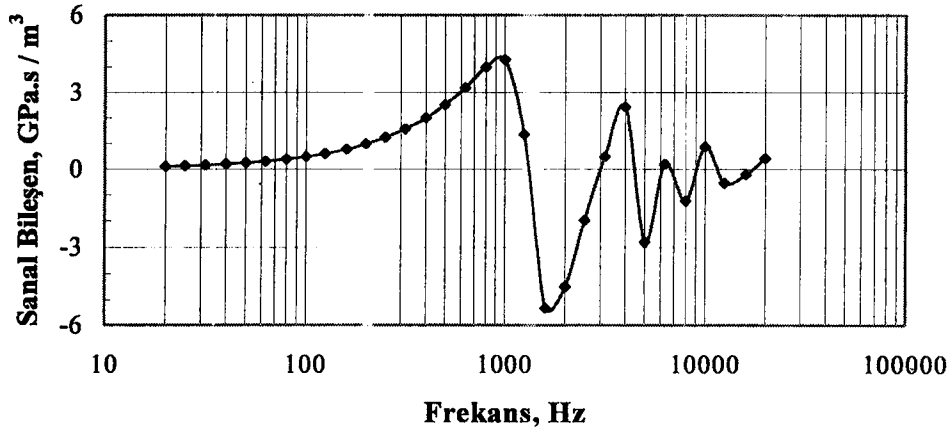
E_v için verilen parametreler kullanılarak gerekli işlemleri yapıldığında

$$E_v = \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{\pi X}} - \frac{3\sqrt{\pi} D_2}{16(\pi X)^{3/2}} \right) + j \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi X}} - \frac{D_1}{2\pi X} - \frac{3\sqrt{\pi} D_2}{16(\pi X)^{3/2}} \right) \quad (\text{EKA-6})$$

olarak bulunur. $0,125 < R < 8$ aralığında ve $X > 5$ için E_v 'nin gerçel ve sanal bileşenleri % 0,01 doğrulukla belirlenmiş değerleri Tablo EKA-1'de verilmiştir.

Ev'nin Gerçel Bileşeni			X	Ev'nin Sanal Bileşeni		
R=0.2	R=0.5	R=1		R=0.2	R=0.5	R=1
0.72127	0.71996	0.72003	1.0	0.24038	0.22323	0.22146
0.80092	0.80122	0.80128	2.0	0.17722	0.16986	0.16885
0.83727	0.83751	0.83754	3.0	0.14818	0.14304	0.14236
0.85907	0.85920	0.85922	4.0	0.13003	0.12614	0.12563
0.87393	0.87402	0.87403	5.0	0.11732	0.11421	0.11380
0.89343	0.89348	0.89349	7.0	0.10030	0.09807	0.09777
0.91082	0.91086	0.91086	10.0	0.08477	0.08321	0.08300
0.93693	0.93694	0.93694	20.0	0.06086	0.06007	0.05997
0.94850	0.94851	0.94851	30.0	0.05002	0.04950	0.04942
0.95540	0.95541	0.95541	40.0	0.04349	0.04310	0.04304
0.96358	0.96359	0.96359	60.0	0.03568	0.03541	0.03538
0.96846	0.96846	0.96846	80.0	0.03098	0.03078	0.03076
0.97179	0.97179	0.97179	100.0	0.02776	0.02761	0.02758
0.98005	0.98005	0.98005	200.0	0.01972	0.01964	0.01963
0.98590	0.98590	0.98590	400.0	0.01399	0.01395	0.01395
0.99003	0.99003	0.99003	800.0	0.00992	0.00990	0.00989

Tablo EKA-1. Ev'nin gerçel ve sanal bileşenleri [IEC Pub. 61094-2, 1992]



Şekil EKA-2. Kompleks ısı transfer fonksiyonu Ev'nin R=0.5 için gerçel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

EKA-2. Kılcal Boruların Akustik Empedansı

Bağlaşımın içindeki ve dışındaki statik basıncı dengelemek için genelde kılcal boru takılır. Bu borular bağlaşım içerisine havadan başka gazların da girmesini sağlar. Açık bir kılcal borunun akustik giriş empedansı:

$$Z_{aC} = Z_{at} \tanh(\gamma \ell_C) \quad (\text{EKA-7})$$

ile verilir. Burada:

Z_{at} : Açık sonsuz borunun kompleks akustik dalga empedansı, Pa.s / m³

ℓ_C : Kılcal borunun uzunluğu, m

Akustik transfer empedansına kompleks düzeltme faktörü Δ_C uygulanarak kılcal boruların şönt etkisi dikkate alınmış olur.

$$\Delta_C = 1 + n \frac{Z_{a12}''}{Z_{aC}} \quad (\text{EKA-8})$$

Burada;

n : Kullanılan aynı özellikli kılcal boru sayısı

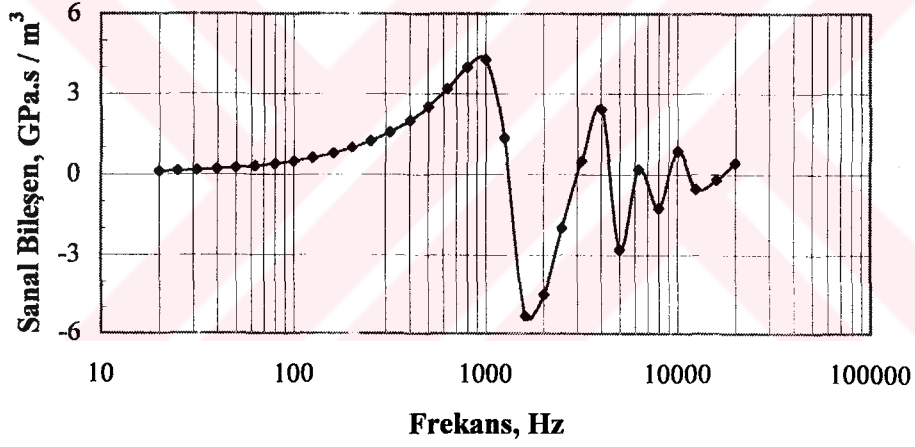
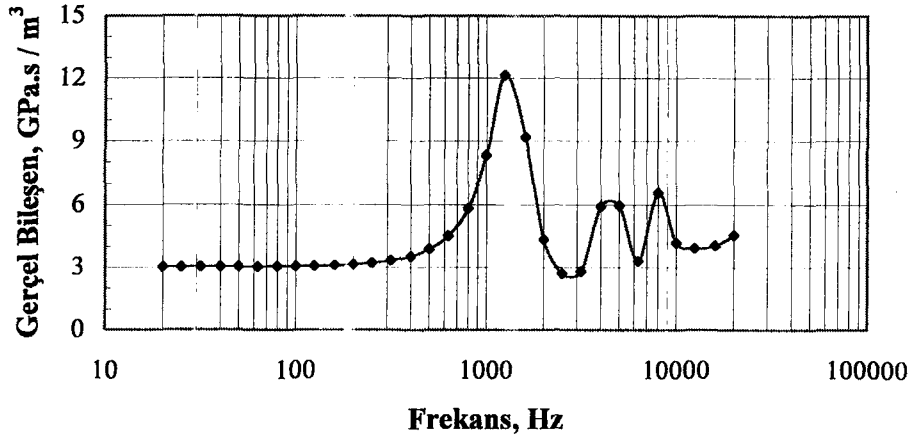
Z_{a12}'' : Isı transfer düzeltmesi uygulanmış akustik transfer empedansı

Kılcal boru kompleks akustik giriş empedansının gerçel ve sanal bileşenlerinin kılcal boru çap ve uzunluğuna göre hesaplanmış değerleri Tablo EKA-2'de verilmiştir. Kılcal boru kullanılmayacak ise içerisine uygun çaplı tel takılarak kapatılır ve düzeltme terimi için $\Delta_C=1$ kullanılır. Kılcal boru için akustik empedans hesaplarında referans çevresel koşullar ve bu değerlerin kullanılarak hesaplanan diğer parametreler kullanılmıştır.

Gerçel Bileşen			Frekans Hz	Sanal Bileşen		
a=0.1667	a=0.20	a=0.25		a=0.1667	a=0.20	a=0.25
3.018	1.457	0.597	20	0.097	0.074	0.049
3.019	1.457	0.597	25	0.122	0.092	0.061
3.020	1.458	0.597	31.5	0.153	0.116	0.077
3.022	1.459	0.598	40	0.195	0.147	0.098
3.025	1.450	0.599	50	0.244	0.184	0.123
3.029	1.463	0.600	63	0.307	0.232	0.155
3.036	1.467	0.602	80	0.390	0.295	0.197
3.047	1.473	0.605	100	0.488	0.369	0.246
3.063	1.482	0.610	125	0.610	0.461	0.308
3.093	1.499	0.620	160	0.782	0.592	0.396
3.137	1.524	0.633	200	0.980	0.743	0.496
3.207	1.564	0.654	250	1.228	0.933	0.623
3.326	1.631	0.689	315	1.556	1.186	0.792
3.534	1.750	0.750	400	1.990	1.527	1.021
3.871	1.943	0.849	500	2.511	1.948	1.306
4.504	2.314	1.034	630	3.189	2.532	1.711
5.807	3.113	1.435	800	3.987	3.353	2.325
8.332	4.890	2.378	1000	4.280	4.213	3.186
12.120	9.008	5.385	1250	1.338	3.162	3.730
9.191	7.926	6.740	1600	-5.333	-4.384	-3.281
4.326	3.021	1.951	2000	-4.500	-3.768	-2.956
2.694	1.637	0.893	2500	-1.996	-1.163	-1.280
2.807	1.580	0.783	3150	0.491	0.244	0.051
5.923	3.536	1.749	4000	2.428	2.283	1.692
5.946	4.825	3.903	5000	-2.803	-2.434	-1.954
3.306	1.939	1.011	6300	0.186	-0.037	-0.190
6.571	5.375	4.137	8000	-1.245	-0.607	0.209
4.184	2.465	1.258	10000	0.872	0.643	0.336
3.902	2.539	1.540	12500	-0.542	-0.699	-0.764
4.043	2.590	1.534	16000	-0.210	-0.399	-0.532
4.535	2.813	1.517	20000	0.430	0.349	0.142

a: Kılcal borunun yarıçapı, mm

Tablo EKA-2. $\ell_c=50$ mm için Z_{ac} 'nin gerçel ve sanal bileşenleri, GPa.s / m³



Şekil EKA-3. Kılcal boru akustik transfer empedansının $a = 0.1667$ mm değerli yarı çapı için gerçel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

EKA-3. Fiziksel Parametreler

Akustik içerisinde bulunan gazın özelliklerini belirleyen bazı büyüklükler için aşağıda verilen ifadeler kullanılır.

Spesifik ısı kapasiteleri oranı

$$\kappa = \frac{p_o \cdot c_o^2}{p_r} (1 - 0,048 \cdot h) \cdot \Delta^2 \quad (\text{EKA-9})$$

Burada:

$h = (P_m/P_s) \cdot (H/100)$: Hava neminin molar konsantrasyon kesri;

P_m : Su buharı doyma basıncı,
296,15 K için $P_m = 2,8101$ kPa [Giacomo, P 1982];

Δ : Dispersiyon düzeltme faktörü,
 $\Delta = 0,99935$ [Harris, C.M. ,1971]

H : Nem, %;

c_o : Ses hızı, 341,45 m/s;

(Not : κ değerini hesaplamak için ortam şartları olarak referans çevre koşulları alınmalıdır.)

Ölçümlerin yapıldığı normal çevresel şartları için hava yoğunluğu ve ses hızı sırasıyla eşitlik 2 ve eşitlik 3 kullanılarak hesaplanır.

$$\rho = \rho_o \cdot \frac{p_s}{p_r} \cdot \frac{T_o}{T} \cdot (1 - 0,378 \cdot h) \quad (\text{EKA-10})$$

$$c = c_o \cdot \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1/2} \cdot (1 + 0,165 \cdot h) \cdot \Delta \quad (\text{EKA-11})$$

Burada:

ρ_o : Hava yoğunluğu, 1,29295 kg/m³

T_o : Mutlak sıcaklık 273,15 K;

T : Ortam sıcaklığı, K.



Akustik empedans hesaplamalarında kullanılan diğer iki parametre de havanın viskozitesi ile ısıl dağılganlıktır (thermal diffusivity). Viskosite, statik basınca bağlı olmayıp sadece sıcaklığa ve spesifik ısı kapasiteleri oranına bağlıdır. Isıl dağılganlık

$$\alpha_t = \frac{9\kappa - 5}{4\kappa} \cdot \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{EKA-12})$$

ifadesi ile hesaplanır. 23 °C, 101325 Pa ve % 50 referans şartları için viskozite $\eta=18,3 \cdot 10^{-6}$ Pa.s ve ısıl dağılganlık $\alpha_t=21 \cdot 10^{-6}$ m²/s değerlerini alırlar.

Yukarıda verilen ifadeler bileşik gazların termodinamik ilişkilerine bağlı olarak verilmişlerdir. Belirtilen fiziksel sabitler için deneysel verilere bağlı olarak ampirik formüller mevcuttur ancak kullanılan bu sabitler için küçük de olsa farklı değerler verirler. Basınç hassasiyetinde ise maksimum 0.01 dB farklılık oluşturabilirler.