

**OTOMOTİV İÇ TRİM MALZEMELERİNDE AKUSTİK  
ÖZELLİKLERİN ISI İLETİMİ İLE İLİŞKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Tunahan DOĞRU**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV İÇ TRİM MALZEMELERİNDE AKUSTİK ÖZELLİKLERİN ISI  
İLETİMİ İLE İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tunahan DOĞRU**  
0000-0002-3879-1421

Doç. Dr. Erhan PULAT  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI


BURSA – 2020  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

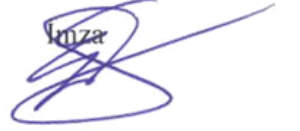
Tunahan DOĞRU tarafından hazırlanan “Otomotiv İç Trim Malzemelerinde Akustik Özelliklerin Isı İletimi ile İlişkinin Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç Dr. Erhan PULAT

**Başkan** : Prof. Dr. Atakan AVCI  
0000-0002-5985-2449  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


**Üye** : Doç. Dr. Erhan PULAT  
0000-0003-2866-6093  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN  
0000-0001-8647-4861  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü

..../..../..

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

13.10.2020



**Tunahan DOĞRU**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV İÇ TRİM MALZEMELERİNDE AKUSTİK ÖZELLİKLERİN ISI İLETİMİ İLE İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

**Tunahan DOĞRU**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Erhan PULAT

Akustik ve termal konfor faktörleri, günümüz tüketicisinin otomobil tercihlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Tüm otomotiv ana ve yan sanayi üreticileri bunun farkına varıp yatırımlarını bu yönde geliştirmektedirler. Bu sebeple izolator tasarımcıları ve üreticilerinin sürekli olarak gelişim içerisinde olması gerekmektedir. Özellikle elektrikli otomobillerin yaygınlaşması sonucu akustik ve termal konfor beklentileri yükselmiştir. Bu çalışmanın amacı, otomobillerde kullanılan yalıtım malzemelerinin ses iletim kaybının, ses yutum katsayısının ve ısı iletim katsayısının deneysel yolla elde edilmesini sağlamaktır. Akustik ve termal etkiler arasındaki bağlantı araştırılacaktır. Elde edilen sonuçlar literatürde karşılaştırmalı olarak yer alacaktır. Bu sayede bu çalışma, otomotiv sektöründe yapılacak termal ve akustik çalışmalarda önemli bir girdi teşkil edecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Ses iletim kaybı, ses yutum katsayısı, ısı iletim katsayısı, iç trim malzemeleri

**2020, ix + 100 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF RELATION BETWEEN ACOUSTIC PROPERTIES AND HEAT CONDUCTION IN AUTOMOTIVE INTERIOR TRIM MATERIALS**

**Tunahan DOĞRU**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Erhan PULAT

Acoustic and thermal comfort factors play an important role in today's customer automobile preferences. All automotive main and sub-industry manufacturers are aware of this and develop their investments in this direction. For this reason, insulator designers and manufacturers must be in continuous development. As a result of the widespread use of electric vehicles, expectations for acoustic and thermal comfort have been increased. Purpose of this studies, to obtain as experimentally sound transmission loss, sound absorption coefficient and thermal conductivity of insulation materials used in vehicles. Relation between acoustic and thermal effects will be investigated. The compared results will be included in the literature. In this way, this study will be an important input for thermal and acoustic studies in the automotive sector.

**Key words:** Sound transmission loss, sound absorption coefficient, thermal conductivity, interior trim materials

**2020, ix + 100 pages.**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Doç. Dr. Erhan PULAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Yük. Tek. Öğr. İbrahim AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda bana destek olan Uğur AKBABA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımdaki yardımlarından dolayı Erkurt Arge A.Ş ve kıymetli çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Tekstil Mühendisliği Laboratuvarında Alambeta Cihazını kullanmamıza izin veren Tekstil Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Dilek KUT'a ve ölçümler sırasındaki yardımlarından dolayı Mehmet TİRİTOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Tunahan DOĞRU

.../.../.....

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Temel Ses Kavramları.....	5
2.2. Uzay ve Zamanda Ses .....	6
2.3. Ses Basıncı, Ses Parçacıklarının Yer Değiştirmesi ve Ses Hızı .....	7
2.4. Ses Yoğunluğu ve Ses Gücü.....	8
2.5. Dalga Denklemi .....	9
2.6. Sinüzoidal Dalgalar .....	11
2.7. Sesin Miktarını Belirtmek .....	13
2.8. Ses Alanı Hesaplamaları .....	14
2.8.1. Yansıma ve iletim .....	14
2.8.2. Ses yutumu ve sesin azaltılması.....	17
2.8.3. Akustik Biot parametreleri .....	23
2.8.4. Ses alanı hesaplamaları için sonlu elemanlar metodu uygulamaları.....	24
2.9. Akustik Ölçümler.....	27
2.9.1. Filtreler .....	28
2.9.2. Mikrofonlar.....	32
2.9.3. Kalibratörler.....	33
2.9.4. Ses seviyesi ölçer .....	33
2.9.5. Alfa kabin ve çınlama odası ölçümleri.....	34
2.9.6. Empedans tüpleri.....	35
2.10. Temel Isı Kavramları .....	35
2.11. Isı İletimi.....	36
2.12. Isı İletimi Katsayısı Ölçümleri.....	41
2.12.1. Isı iletim katsayısının ölçülmesinde sürekli rejim yöntemleri .....	43
2.12.2. Isı iletim katsayısının ölçülmesinde geçici rejim yöntemleri .....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	48
3.1. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemeleri .....	49
3.2. Ölçüm Cihazları.....	56
3.3. Empedans Tüpü .....	57
3.4. Ses Yutum Katsayısının Empedans Tüpü Yoluyla Elde Edilmesi .....	58
3.5. Ses İletim Kaybının Empedans Tüpü Yoluyla Elde Edilmesi.....	60
3.6. Isı İletim Katsayısının Alambeta Cihazıyla Elde Edilmesi .....	62
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	65
4.1. Dokumasız İgnelenmiş Ürünlere Ait Ölçüm Sonuçları .....	65
4.2. Mineral Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları .....	69
4.3. Ağır Katman Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları .....	73
4.4. Keçe Tipi Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları .....	77
4.5. Poliüretan Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları.....	81
4.6. Literatürde Yer Alan Ses Yutum Katsayısı Verileriyle Karşılaştırma.....	84



5. SONUÇ .....	85
KAYNAKLAR.....	89
EK 1. Farklı Malzemelere Ait Isı İletim Katsayıları .....	97
EK 2. Çalışmadaki Bazı Malzemelere Ait Isı İletim Katsayıları .....	98
EK 3. Sıklıkla Kullanılan Bazı Malzemelerin Ses Yutum Katsayıları .....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	100

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\omega$	Açısal hız
$\varepsilon$	Akustik enerji değişim oranı
$p$	Basınç genliği
$\lambda$	Dalga boyu
$f$	Frekans
$k$	Isı iletim katsayısı
$S$	Kesit alanı
$\mu$	Mikro
$T_{eq}$	Mutlak sıcaklık
$p_0$	Ortam basıncı
$\rho$	Ortam yoğunluğu
$\gamma$	Sabit basınçtaki özgül ısı
$L_p$	Ses basınç seviyesi
$c$	Ses hızı
$T_i$	Ses iletim katsayısı
$TL$	Ses iletim kaybı
$\vec{v}$	Ses parçacıklarının hızı
$\zeta$	Ses parçacıklarının yer değiştirmesi
$W$	Ses şiddeti
$I$	Ses yoğunluğu
$\alpha$	Ses yutum katsayısı
$T$	Periyot
$\alpha_k$	Viskoz ses yutum katsayısı
$R$	Yansımaya katsayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
dB	Desibel
EVA	Etilen vinil asetat
FFT	Fast Fourier Transform
Hz	Hertz
HVAC	Heating Ventilating and Air Conditioning
NVH	Noise vibration harshness
Pa	Pascal
PES	Polyester
PET	Polietilen tereftalat
PP	Polipropilen
PVC	Poli vinil klörür
SN	Signal to noise
SPL	Ses basınç seviyesi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Ses basıncı duyum aralığı .....	6
Şekil 2.2. Uzay ve zamanda sinüzoidal dalga .....	11
Şekil 2.3. Kompleks düzlemde sinüzoidal dalgaya bağlı sanal kısım .....	12
Şekil 2.4. Yansıma ve iletim durumu.....	15
Şekil 2.5. Gözenekli malzemelerin ses yutum eğrisi davranışları .....	23
Şekil 2.6. Sonlu eleman şekilleri .....	26
Şekil 2.7. Eşdeğer sürekli ses düzeyinin matematiksel olarak hesaplanması .....	28
Şekil 2.8. Farklı oktav bant filtrelerinin karşılaştırılması .....	31
Şekil 2.9. a) Rastgele etki alanı b) serbest alan c) basınç mikrofon tipleri .....	32
Şekil 2.10. Brüel&Kjær mikrofon kalibratörü .....	33
Şekil 2.11. Bir ses seviyesi ölçerin blok şeması .....	33
Şekil 2.12. Çınlama odası ve bölümlerinin şematik gösterimi .....	34
Şekil 2.13. İnsanın termal konfor arayışı .....	35
Şekil 2.14. Fourier yasasına göre ısı geçişi .....	36
Şekil 2.15. Isı iletimi şematik gösterimi .....	37
Şekil 2.16. Kartezyen koordinatlarda diferansiyel elemanı .....	37
Şekil 2.17. Isı iletimi denklemi şeması .....	38
Şekil 2.18. Silindirik koordinatlarda diferansiyel elemanı.....	40
Şekil 2.19. Küresel koordinatlarda diferansiyel elemanı .....	41
Şekil 2.20. Katı ve kalın malzemede Fourier Yasası.....	42
Şekil 2.21. Sıcak plaka metodunun şeması a) tek numuneli aparat ve b) çift numuneli aparat.....	44
Şekil 2.22. Isı iletim katsayısı ölçümü a) Doğrusal b) Radyal .....	45
Şekil 2.23. Isı akış ölçüm yöntemi.....	46
Şekil 2.24. Sıcak tel ölçüm yöntemi .....	46
Şekil 2.25. Geçici düzlem kaynağı yöntemi.....	47
Şekil 3.1. Yankılı ve yankısız oda arasında yapılan ölçümler.....	48
Şekil 3.2. Araç ses ve titreşim kaynakları .....	50
Şekil 3.3. Araç ses ve titreşim frekansları.....	50
Şekil 3.4. Araçta yönetilmesi gereken termal yükler .....	51
Şekil 3.5. Keçe tipi ön göğüs izolatörü .....	52
Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan numunelere ait görseller .....	55
Şekil 3.7. a)29 mm ve b) 100 mm çaplarındaki empedans tüpleri .....	57
Şekil 3.8. Tüp içerisindeki numuneye dolgu macunu uygulanması .....	58
Şekil 3.9. Yutum halindeyken empedans tüpü test düzeneği.....	59
Şekil 3.10. Ses yutum katsayısı ölçümünün şematik gösterimi.....	59
Şekil 3.11. İletim halindeyken empedans tüpü test düzeneği.....	61
Şekil 3.12. Ses iletim kaybı ölçümünün şematik gösterimi .....	62
Şekil 3.13. Alambeta cihazının şematik gösterimi .....	63
Şekil 3.14. BUÜ Tekstil Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Alambeta cihazının a) yandan b) önden görünüşü .....	64
Şekil 4.1. Dokumasız iğnelenmiş ürünlerin a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları .....	66
Şekil 4.2. Dokumasız iğnelenmiş ürünlere ait ısı iletim katsayısı sonuçları.....	68
Şekil 4.3. Dokumasız iğnelenmiş ürünlerin frekans bandı ortalaması a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları .....	69

Şekil 4.4. Cam ve taş yününe ait a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları ..	70
Şekil 4.5. Mineral malzemelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	72
Şekil 4.6. Cam ve taş yününe ait frekans bandı ortalaması a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları.....	72
Şekil 4.7. Ağır katman karışımların a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları .....	74
Şekil 4.8. Ağır katman karışımlarına ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	75
Şekil 4.9. Ağır katman karışımların a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları .....	76
Şekil 4.10. Keçe malzemelerinin a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları..	77
Şekil 4.11. Keçe tipi malzemelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	79
Şekil 4.12. Keçe malzemelerinin frekans bandı ortalama a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları.....	80
Şekil 4.13. Poliüretan malzemelerinin a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları .....	81
Şekil 4.14. Poliüretan malzemelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	83
Şekil 4.15. Poliüretan malzemelerinin frekans bandı ortalaması a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları .....	83
Şekil 4.16. Literatürde yer alan ses yutum verileri ile bu çalışmadaki sonuçların karşılaştırılması.....	84

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Farklı basıncı seviyelerinde insanların duyma hassasiyeti .....	13
Çizelge 2.2. Oktav ve üçüncü oktav filtreleri için g ve h sabitlerinin değerleri.....	31
Çizelge 2.3. Termal karakterizasyon için kullanılan bazı ölçüm metotları.....	43
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan numuneler .....	54
Çizelge 3.2. Cihaz listesi .....	56
Çizelge 4.1. Dokumasız iğnelenmiş ürünlere ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	67
Çizelge 4.2 Cam yünü ve taş yünü malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	71
Çizelge 4.3. Ağır katman karışımı malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları .....	75
Çizelge 4.4. Keçe malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları.....	78
Çizelge 4.5. Poliüretan malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları.....	82

## 1. GİRİŞ

Günümüz taşıt kullanıcılarının konfor beklentileri her geçen gün artmaktadır. Taşıt kabinlerindeki yolcuların, motor ve çevre gürültüsünün azaltılması, araç içi sıcaklığın korunması, otonom sürüş sistemleri, dokunmatik ekran gibi bazı konfor beklentileri bulunmaktadır. Otomobilin bulunduğu çevre ortamından ve araç motorundan gelen ısı ve gürültünün azaltılması günümüz kullanıcıları açısından sürekli iyileştirilmesi gereken bir beklentidir. Bu sebeple otomotiv ana sanayi üreticileri rekabetçi yalıtım malzemelerini sunan tedarikçilerle çalışmayı tercih etmektedir. Her geçen gün yalıtım malzemelerinin ve tasarımlarının iyileştirilmesi, araç geometrisine en uygun olanın tercih edilmesi gerekmektedir. Araç üzerinde birçok farklı tipte yalıtkan malzeme bulunabilir fakat temel istekler bu yöndedir. Özellikle elektrikli otomobillerin yaygınlaşmasıyla konfor özelliklerinin iyileştirilmesi beklentisi daha da artmıştır. Çünkü engellenmesi gereken motor gürültüsü yavaşça ortadan kalkmaktadır. Ayrıca araç içi ısıtma ve soğutma sistemleri içten yanmalı araçlarda motor ile ilişkiliyken elektrikli araçlarda doğrudan batarya sistemleri ile ilişkilidir ve bu sebeple aracın bir şarj edilişte gideceği yol mesafesini doğrudan etkilemektedir. Bu sebepler doğrultusunda yalıtım metodu iyileştirilmelidir.

Otomotiv ana sanayi üreticilerinin bu isteklerinin yanı sıra bir de temel isteği bulunmaktadır. Yalıtım yeteneği güçlü fakat maliyeti de düşük ürünleri tercih etmektedirler. Tasarım aşamasında yanlış malzeme seçilirse ve yalıtım istekleri karşılanamazsa yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Uygun araç geometrisine göre uygun boyutlarda ve tasarımda, en uygun malzeme hızlı bir biçimde sunulmalıdır. Bu sebeple malzeme ve tasarım parametrelerine dair önceden fikir sahibi olunması ve en iyi çözümün sunulması önem kazanmaktadır (Aydın 2008).

Dokumasız iğnelenmiş ürünler, hafiflik, ses verimliliği, esneklik, kalıplanabilirlik, geri dönüştürülebilirlik, düşük işlem ve malzeme maliyetleri ve cazip bir maliyet / performans oranı nedeniyle otomotiv endüstrisinde çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır (Chen ve ark. 2005). Bu tip dokumasız ürünler, otomotiv pazarında koltuk kaplamalarından tavan döşemelerine, bagaj kaplamalarına ve taban halılarına kadar önemli bir rol oynamaktadır ve kullanıcı tarafından görülecek yüzeyleri oluşturmaktadır (Wubbe 2003).

Dokumasız ürünlerin termal özellikleri araştırmacılar tarafından yoğun olarak incelenmiştir. Genel olarak, dokumasız ürünlerin ısı yalıtım özellikleri, elyaf boyutuyla ve yapısal parametrelerle güçlü bir korelasyona sahiptir (Thilagavathi ve ark. 2010). Arambakam ve ark. (2013) lifli yalıtım malzemelerinin ısı performansını sayısal olarak araştırmış, lif çapı ve lif oryantasyonlarını arttırarak lifli yapılar yoluyla ısı iletiminin arttığı sonucuna varmıştır. Behera ve Mishra (2007) sabit bir ağırlık için ısı yalıtımının kalınlıkla arttığını özetlemişlerdir. Doğal yöntemlerle oluşturulan elyaf tipleri de bu tip araştırmalara konu olmuştur. Literatürde Korjenic ve ark. (2011), jüt, keten ve kenevir ile güçlendirilmiş kompozitlerin ısı yalıtım özelliklerini araştırmıştır. Sonuçlara göre, numunelerin ısı iletim katsayıları 0,0458-0,0393 W/mK arasındadır.

Bunlarla birlikte, dokumasız ürünlerin gürültü kontrol performansını anlama konusunda yapılan çok fazla araştırma ve modelleme çalışması literatürde bulunmaktadır. Na ve ark. (2007) beş mikro fiber elyafın ve bir normal fiber elyafın ses yutum katsayılarını çınlama odası ile incelemiştir. Çınlama odası metodu ile mikro fiber elyafın ses emiliminin aynı kalınlık veya ağırlıktaki geleneksel kumaşlardan üstün olduğunu tespit etmişlerdir. Shu ve ark. (2011) dört farklı elyaf tipinin empedans tüpü yöntemi ile akustik absorpsiyon özelliklerini incelemiş ve daha düşük bir elyaf yoğunluğuna sahip bir kumaşın daha iyi bir ses yutum performansını sağladığını bildirmiştir. Wang ve Torng (2001) bazı gözenekli fiber malzemelerin ses yutum karakteristiklerini deneysel olarak elde etmişlerdir. Farklı yoğunluktaki taş ve cam yünlerinin ses yutum katsayılarını elde etmişlerdir. Numune kalınlığının arttırılmasının, özellikle düşük frekans aralığında ses yutum yeteneğini geliştireceği sonucuna varmışlardır. Zhu ve ark (2015), farklı lif karışım oranlarının ve kütle yoğunluklarının benzer kalınlıklardaki hava geçirgenliği ve ses yutum katsayısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hava akış direncinin ses yutum katsayısını önemli derecede arttırarak etkilediğini ispatlamıştır.

Genellikle bu tiplerde olan malzemelerin termal ve akustik özelliklerinin ayrı ayrı elde edilmesi ile ilgili çalışmalar literatürde çokça yer almaktadır. Bu çalışmaların birlikte yapıldığı, termal ve akustik özelliklerin birlikte incelenerek aralarındaki ilişkinin yorumlandığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Eyüpoğlu ve ark. (2018), perlit kaplı kumaşların hava, ısı ve ses performansının incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, farklı ağırlıklarda polyester (PES) dokumasız ürünlerin, tane büyüklüğü 210-590 um arasında olan perlit taş tozu ile kaplayarak ısı iletim katsayısı, ses yutum katsayısı ve hava geçirgenliği değerlerini elde etmişlerdir. Sonuçlara göre, ağırlıktaki artış, numunelerin ses yalıtımı ve hava geçirgenliğinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca, numunenin ağırlığındaki azalma, ısı yalıtımında da artışa neden olmuştur. Ağırlığın artırılması ses yalıtımını iyileştirirken ısı yalıtımında azalmaya sebep olmuştur.

Yang ve ark. (2016), dokumasız ürünlerin akustik değerlendirilmesi ve ısı özellikleriyle ilişkisi üzerinde yaptıkları çalışmada yedi farklı ağırlıktaki kumaşa ait gürültü azaltma katsayısı, ses yutum katsayısı değerlerini ve ayrıca ısı iletkenlik ile ısı direnç değerlerini elde etmişlerdir. Ses yutum katsayısı ve ses azaltma katsayısının ısı iletim katsayısı ile önemsiz de olsa bir korelasyonu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu akustik değerler ile ısı direnç arasında güçlü bir korelasyon oluştuğunu belirtmişlerdir. Daha yüksek bir termal dirençte olan dokumasız ürünlerin daha iyi bir ses yutum performansı göstereceği sonucuna varmışlardır.

Thilagavathi ve ark. (2010), doğal dokumasız fiber ürünlerin geliştirilmesi ile araçlarda gürültü kontrolü çalışmaları amacıyla bambu, muz, jut gibi doğal katkı polipropilen kumaşların ısı iletim ve ses yutum katsayılarını elde etmişlerdir. Polipropilen katkı bambu ile elde edilen kumaşın araçlarda kullanılabilir seviyede ses yutum katsayısına ve diğer katkı kumaşlara göre daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Önerilen diğer katkı kumaşların ise tiyatro, oditoryum gibi dış mekanlarda akustik duvar kaplaması olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir.

Ahmed (2016), elyaf tiplerinin otomobillerde kullanılan dokumasız ürünlerin akustik ve termal özellikleri üzerine etkisini incelemek üzere çalışmıştır. Dokumasız polyester kumaş, cam yünü, jüt elyafı gibi tekstil malzemeleri kullanmıştır. Ses yutum katsayısı, hava geçirgenliği ve kalınlık arasında ters orantılı bir ilişki olduğu sonucuna ulaşmıştır. 4000-6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı açısından en iyi değerleri jut numuneleri vermiştir. 315-3150 Hz aralığında ise en yüksek ses emilimini cam yünü sağlamıştır. Cam yünü numuneleri ısı yalıtımı açısından en yüksek değere sahip olarak



jut ve atıklardan elde edilen diğer numunelerden daha iyidir. Isı yalıtımı açısından atıklardan elde edilen numuneler en düşük değere sahiptir.

Farklı yapılarda ve farklı üretim teknikleri ile üretilen otomotiv malzemelerinin akustik ve termal özelliklerinin karşılaştırılmasına literatürde yer verilmiştir. Akustik ve termal konfor açısından en iyi değerleri sağlamak adına bu çalışmaların sürekli olarak yapılması ve gelişen otomotiv malzemeleri için literatürde yer alması gerekmektedir. Otomotiv ana sanayi tedarikçilerinden sürekli gelişen malzemeler ile iyileştirmeler ve maliyet azaltmaları beklemektedir. Bu sebeple bu çalışma literatürde yer alması, farklı malzemelerin karşılaştırılması ve belirtilen fiziksel özelliklerin ilişkisinin incelenmesi adına yapılmıştır.

Bu çalışmada farklı tipte yalıtım malzemeleri karşılaştırılacaktır. Malzemeler dokumasız elyaflı ürünler, ağır katman karışımı visko elastik malzemeler, poliüretan köpükler, keçe yapısındaki elyaflar ve mineral katkılı malzemeler olmak üzere farklı gruplardan seçilmiştir. Seçilen bu malzemeler yer aldıkları gruplara göre karşılaştırılacaktır. Üretim teknolojisinin izin verdiği ölçüde elde edilen malzemeler içeriklerine, ağırlıklı alanlarına ve kalınlıklarına göre karşılaştırılacaktır.

Öncelikle bu malzemelerin ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısı empedans tüpü ile elde edilecektir. Yine aynı malzemeler için Alambeta cihazı ile bu malzemelere ait ısı iletim katsayısı elde edilecektir. Farklı içerik, yoğunluk ve kalınlıktaki birden çok malzeme bu yöntemle kıyaslanmış olacaktır. Elde edilen sonuçlara göre akustik ve termal özellikler arasındaki bağlantı arasında yorum yapılacaktır.

Bu çalışmada yer alan numuneler otomotiv sektöründe müşteri ihtiyaçları doğrultusunda kullanılmaktadır. Araç üzerinde farklı bölgelerde kullanılması gerektiği gibi aracın aynı bölgelerinde farklı alternatifler olarak tercih edilebilmektedir. Otomotiv iç trim malzemelerine yönelik bu alternatifler arasından akustik ve termal açıdan en iyi özelliklere sahip olan numunenin belirlenmesi malzeme seçimlerinde yardımcı olacaktır. Uygun bir tasarım oluşturulması için bu karşılaştırma sonuçları yol gösterici olacaktır.

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

Bu çalışmada yapılacak olan deneyler doğrultusunda elde edilecek olan sonuçlar akustik ve termal fizik dalları ile doğrudan ilişkilidir.

### **2.1. Temel Ses Kavramları**

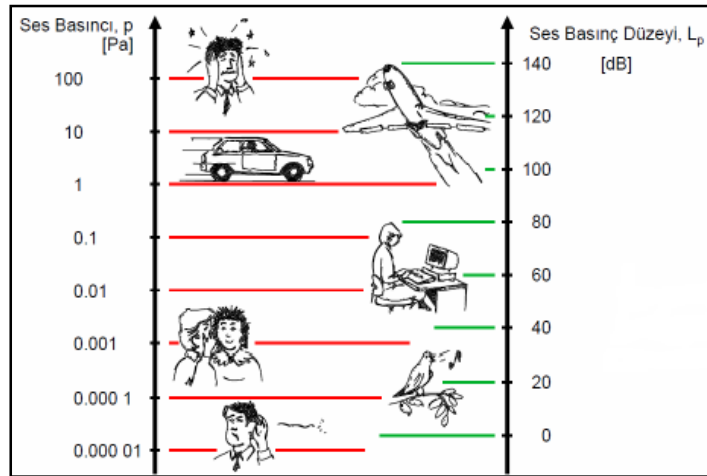
Ses günlük hayatın vazgeçilmez bir parçasıdır. Konuşarak anlaşılabilmeyi sağlarken, kimi zaman da tehlikelere karşı uyarıcıdır. Ses, günlük hayattaki yaşamın kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan birisidir. Ses, kulağın algılayabileceği basınç değişimi olarak tanımlanmaktadır. Sesle ilgilenen bilim dalına akustik adı verilir ve bu bilim dalı, sesin üretilmesi, yayılması ve algılanması ile ilgili tüm alanları kapsamaktadır. Akustik, bir fizik dalıdır ve bu nedenle, dünya hakkında anlattığı her şeyin bir anlam ifade etmesi gerekmektedir.

PACS 2010'a göre akustik çalışma alanları bazı özel konulara ayrılmaktadır (Anonim 2013b). Teorik akustik, ses alanı hesaplamaları için analitik ve sayısal yöntemleri içermektedir. Doğrusal olmayan akustik, patlama gibi aşırı yüksek ses basıncı olaylarında meydana gelen doğrusal olmayan etkiler veya ses hızından daha hızlı hareket eden nesnelerin ses patlamalarını içermektedir. Su altı akustiği, sudaki ses yayılımı, sonar sistemleri, sismik keşiflerle alakalı çalışmalardır. Gürültü kontrolü, gürültü kaynaklarının tanımı ve modellenmesi, gürültü koruma önlemleri üzerine araştırmalardan oluşmaktadır. Oda akustiği, odalarda ses alanlarının değerlendirilmesi, planlanması ve tahmini üzerine çalışılan alandır. Bina akustiği, binalarda gürültü kontrolü, bina yapılarının iletim kaybı çalışmalarını içermektedir. Elektro akustik dönüştürücüler (mikrofonlar, hoparlörler), kayıt cihazları, genel seslendirme sistemleri, akustikte sinyal işleme çalışmalarından oluşmaktadır. Kulağın akustiği, kulağın yapısı, kulağın özellikleri, ses algısı ve öznel değerlendirmesini içermektedir. Otomotiv sektöründe yapılan çalışmalar teorik ses alanı hesaplamaları, gürültü kontrolü, oda akustiği konularında yer almaktadır.

Ses terimi, dalga benzeri yayılım ile mekanik salınımlar anlamına gelmektedir. Ses dalgaları havada, sıvılarda veya katı cisimlerde yayılabilmektedir. İnsan kulağının algısal yeteneklerine karşılık olarak, üç farklı frekans aralığı ayırt edilir. İşitme aralığı sağlıklı

insanlarda yaklaşık 20 Hz ila 20 kHz arasında uzanmaktadır. Düşük frekanslara kızılötesi, yüksek frekanslara ultra ses denmektedir (Rosen ve Howell 2011).

Ayrıca insan kulağı lineer artışlara karşı değil, logaritmik artışlara karşı hassastır. Akustik olarak sesin değerlendirilmesinde, ölçülen bir referans seviye basıncının logaritması olan desibel (dB) ölçeği kullanılmaktadır. Sesin algılanabilir seviyeleriyle ilgili bilgi sahibi olmak için ölçeklendirme kullanılmaktadır. Böylelikle lineer şekilde artan ve çok geniş bir aralığa sahip olan skala insan kulağının işitme eşiğinden başlayarak acı eşiğinde sonlanan bir skalaya dönüşmektedir. İşitme eşiğinin 0 dB ve acı eşiğinin 130 dB olduğu basitleştirilmiş skala sayesinde diğer ses kaynaklarına ait sesler rahatça karşılaştırılabilmektedir. Lineer ve logaritmik skalaların karşılaştırılması Şekil 2.1’te görülmektedir (Ingard ve Dear 2005).



**Şekil 2.1.** Ses basıncı duyum aralığı (Ingard ve Dear 2005)

Ayrıca sesin fiziksel açıdan daha net bir şekilde değerlendirilmesi için uzay ve zamanda yer alan konumu hakkında da bilgi sahibi olunmalıdır.

## 2.2. Uzay ve Zamanda Ses

Sesi tanımlamak için bir yol gerekmektedir. Ses hakkında fiziksel olarak düşünmenin ilk açık yolu, bir noktada ölçülen bir sinyal olarak insan kulağı veya bir mikrofondur. Basınç ölçülürse, bu sinyal  $p(t)$  olarak yazılabilir. Zamanla değişmektedir ve eğer istenirse kaydedilebilmektedir. Öte yandan, herhangi bir zamanda, iki kişi, sesi iki farklı konumda ölçebilir. Sesin konumun bir işlevi olduğu ve  $p(x)$  diyerek ifade edilebileceği

söylenilmektedir. Ses hem zamana hem de konuma bağlıdır, bu sebeple  $p(x, t)$  yazılabilir. Öte yandan, bir noktada ölçülen basınç ile başka bir noktada ölçülen basınç arasında bir bağlantı olması gerektiği bilinmektedir. Ses, zaman ve uzayda bağımsız olarak değişmez (Carley 2001). Dolayısıyla, iki sesin bazı zaman farklarının olası istisnası ile aynı olduğunu bilinmektedir.

$$p(t) = q(t + \Delta t) \quad (2.1a)$$

Denklem 2.1'de yer alan  $\Delta t$  bir zaman farkıdır. Eğer sesin  $c$  hızıyla geldiği varsayılırsa,  $\Delta t = R / c$  olduğu söylenilebilir ki burada  $R$  bir mesafedir. Daha sonra şu yazılabilir.

$$p(t) = q\left(t \pm \frac{R}{c}\right) \quad (2.1b)$$

Bu denklemler açıklamaktadır ki iki sinyal arasındaki zaman farkı, sesin üzerinde hareket etmesi gereken bir mesafe ile ilişkilidir.

### 2.3. Ses Basıncı, Ses Parçacıklarının Yer Değiştirmesi ve Ses Hızı

20  $\mu\text{Pa}$  ile 100 Pa arasında değişen duyulabilir ses basınç değişimleri, statik hava basıncıyla karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyedir. 20  $\mu\text{Pa}$  ortalama bir kişi tarafından duyulabilecek en düşük ses seviyesi olarak kabul edilmiştir ve bu yüzden duyum eşiği olarak anılmaktadır. 100 Pa ise çok yüksek bir seviyedir ve acıya neden olabilmekte, bu sebepten dolayı da acı eşiği olarak adlandırılmaktadır (Beranek 1986).

Atmosferik basınç deniz seviyesinde en yüksek seviyededir ve yükseklikle azalmaktadır. Ortalama olarak atmosferik basınç yaklaşık 100 000 Pa'dır. 1 m yükseklikte, yaklaşık 12 Pa'lık bir değişiklik oluşmaktadır. Atmosferik basınç, ses dalgalarının bir sonucu olarak küçük dalgalanmalarla üst üste gelmektedir. İnsan kulağı sadece bu değişikliklere karşı hassastır. Sonuç olarak, atmosferik basınca göre meydana gelen hızlı dalgalanmalara ses basıncı denir. Ses dalgasının statik ortam basıncının üzerinde yarattığı lokal basınç değişimleridir (Hansen 1951).

$$p(t) = P(t) - P_{atm} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de belirtilen  $p(t)$  ses basıncı,  $P(t)$  anlık hava basıncı ve  $P_{atm}$  atmosferik basınçtır.

Gaz parçacıklarının hareketi, ses parçacıklarının yer değiştirmesi  $\zeta$  ve ses parçacık hızı  $\vec{v}$  ile tanımlanmaktadır. Ses parçacık hızı  $\vec{v}$ , yayılım yönünü gösteren bir vektördür.

$$v(t) = \frac{d\zeta}{dt} \quad (2.3)$$

Ses basıncı ve ses parçacık hızı, akustik işlemleri tanımlamak için iki temel miktarı temsil etmektedir. Ses hızı, akustik ortamda ilerleyen basınç dalgasının hızıdır.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te belirtilen  $p_0$  ortam basıncı,  $\rho$  ortam yoğunluğu ve  $c$  (m/s) ses hızıdır.

Sesin yayılması olayı, yay mekanizması ile benzer özellikleri taşımaktadır. Bir yay sıkıştırıldığında, oluşan bu sıkışma hareketi yay boyunca ilerlemektedir. Hava molekülleri sıkışıp genleştiği zaman da aynı olay meydana gelmektedir; sıkışma ve genleşme hareketi veya başka bir anlatımla basınç değişiklikleri hava içerisinde yayılmaktadır.

#### 2.4. Ses Yoğunluğu ve Ses Gücü

Bir ses dalgasına ilişkin enerji taşınımı ses yoğunluğuyla tanımlanmaktadır.

$$I = \overline{p\vec{v}} \quad [W/m^2] \quad (2.5)$$

Ses yoğunluğu biliniyorsa,  $S$  bölgesinden geçen ses gücü  $W$ , aşağıdaki eşitlikten elde edilmektedir.

$$W = \int \vec{I} d\vec{S} \quad [W] \quad (2.6)$$

Ses gücü, ortam koşullarından bağımsız olarak, herhangi bir kaynağın yarattığı akustik güç olarak tanımlanmaktadır. Bu gücün sonucu ise algılanan veya ölçülebilen ses basıncıdır. Burada empedanstan da bahsetmek gerekmektedir. Ses basıncı ve ses parçacık hızı oranı, akustik empedans  $Z$  olarak tanımlanır.

$$Z = P/v \quad (2.7)$$

## 2.5. Dalga Denklemi

Akustik, fiziksel ve matematiksel açıdan bir akışkan için dalga denkleminin çözümlerinin çalışması olarak tanımlanmaktadır. Aşağıda elde edilecek doğrusal dalga denklemi, küçük düzensizliklerin sıkıştırılabilir bir ortamda yayılmasını gösteren denklemdir. Dalga denklemi, farklı sistemlere ait denklemler olarak uygulanabilir, burada Navier-Stokes denklemlerinin yönettiği sıvılara uygulanması gerekmektedir. Viskoz olmayan bir akışkan için süreklilik ve momentum denklemleri şunlardır:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2.8)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p + \rho v \nabla v = 0 \quad (2.9)$$

Bu denklemler öncelikle maddenin korunduğunu ve ikinci olarak da Newton'un yasalarının katı parçacıklarda olduğu kadar akışkan için de geçerli olduğunu ifade etmektedir. Bir dalga denklemi türetmek için yapılması gereken ilk şey, akışkanın dinamik miktarlarındaki dalgalanmaların küçük olduğu varsayımdır. Bu dalgalanmalar, ihmal edilebilir boyuttadır.

$$\rho = \rho_0 + \rho'(t) \quad (2.10)$$

$$v = v_0 + v'(t) \quad (2.11)$$

$$p = p_0 + p'(t) \quad (2.12)$$

Bu varsayımı süreklilik ve momentum denklemlerine uygulayarak ve denklemlerin ikinci dereceden terimleri ihmal edilerek doğrusallaştırılmış Euler denklemleri elde edilmektedir (Carley 2001).

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot v' = 0 \quad (2.13)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v'}{\partial t} + \nabla p' = 0 \quad (2.14)$$

Burada hız vektörü  $v'$  için ayrı tek bir eşitlik yazılabilmektedir (Carley 2001).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot v' \right) - \nabla \left( \rho_0 \frac{\partial v'}{\partial t} + \nabla \cdot p' \right) = \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = 0 \quad (2.15)$$

Yoğunluğu ortadan kaldırmak için denklem ile basınç arasında bir ilişki kurulmalıdır. Bu ilişki, aşağıda görüldüğü gibi akışkanın termodinamik özelliklerine bağlıdır. Her şey doğrusal olarak alındığı için, basınç-yoğunluk ilişkisi de doğrusal alınabilir.

$$p = p_0 + \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots,$$

$$p' = p - p_0 \approx \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho - \rho_0) = c^2 \rho',$$

$$c^2 = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} \quad (2.16)$$

Sabit  $c^2$  ile yazılır çünkü daima pozitifdir. Bu şekilde akustik basınç için dalga denklemini elde edilmektedir.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (2.17)$$

Denklem 2.17 uzayda ve zamanda ses alanının özelliklerini ve bu özelliklerin nasıl geliştiğini açıklamaktadır. Sıkıştırılmaz akış denklemlerinden farklıdır çünkü büyük mesafelerde gerçekleşen çok zayıf süreçleri tanımlamaktadır.

Dalga denkleminin en temel özelliği doğrusal olmasıdır. Bu, dalga denkleminin iki çözümünün toplamında, kendisinin de bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sebeple burada karşılıklı bir transfer ilkesinden söz edilebilmektedir. Karşılıklı transfer ilkesi gereği mikrofon ve ses kaynağı aynı mantığa göre çalışmaktadır. Dalga denkleminin çözümü sıvının termodinamik özelliklerine bağlıdır ve ses yayılımının adyabatik olduğu varsayımıyla hesaplanmaktadır. Bir gazda adyabatik bir basınç işlemi için Denklem 2.18 kullanılmaktadır. Burada  $\gamma$ , özgül ısı oranıdır. (Carley 2001)

$$p = k p^\gamma \quad (2.18)$$

Adyabatik işlemlerde kullanılan bu denklem akustik basınç için elde edilen Denklem 2.16 yerine konulursa aşağıdaki Denklem 2.19 elde edilmektedir.

$$c^2 = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = \gamma k p^{\gamma-1} = \frac{\gamma p}{\rho} ,$$

$$p = \rho RT ,$$

$$c^2 = \rho RT \quad (2.19)$$

Havadaki ses hızı 343m/s'dir. Adyabatik varsayımın geçerliliği, sesin frekansına bağlıdır. Düşük frekanslı ses için, akışkanda iletim yoluyla kayda değer bir ısı oluşumu yoktur varsayımı yapılabilmektedir. Hava için düşük frekans, 1 GHz'den daha az anlamına gelmektedir.

## 2.6. Sinüzoidal Dalgalar

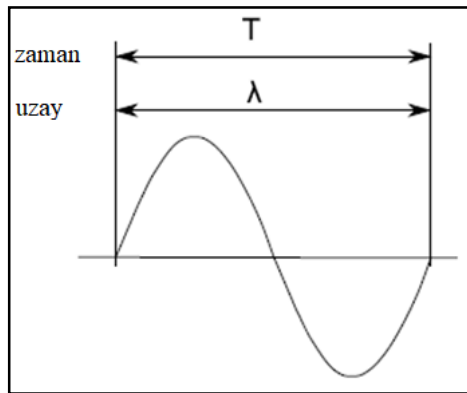
Sinüzoidal zamana bağlı dalgalar teorik yaklaşımlar için önemli bir rol oynamaktadır. Bu tür dalgalar, frekansları  $f$  veya açısal frekansları  $\omega$  veya periyot uzunlukları  $T$  ile tanımlanmaktadır.

$$f = 1/T \quad (2.20)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.21)$$

Sinüzoidal dalga üzerindeki sabit bir nokta,  $T$  süresi içinde bir  $\lambda$  dalga uzunluğunu hareket ettirmektedir. Şekil 2.2'de uzay ve zamanda yer alan bir sinüzoidal dalga gösterilmektedir.

$$\lambda = c/f = cT \quad k = 2\pi/\lambda \quad (2.22)$$



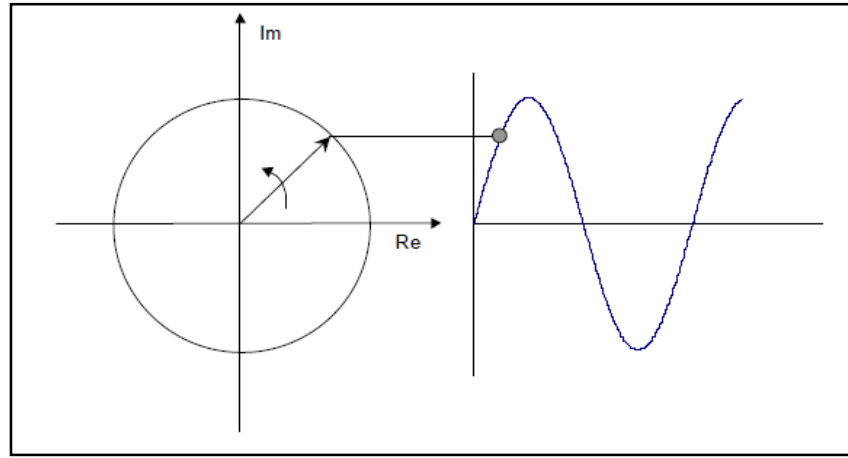
Şekil 2.2. Uzay ve zamanda sinüzoidal dalga (Carley 2001)



Sinüzoidal davranışı olan dalgalar belirli bir genlik ve saat yönünde sabit açısal hıza sahip açısal frekansa göre döndüğü Şekil 2.3'te görülmektedir. Dalga'nın işaretçisinin  $t = 0$ 'daki açısı ilk faza  $\phi$  karşılık gelmektedir. İşaretçi, sinüs fonksiyonunu tanımlayan hayali kısmı işaret etmektedir. Gerçek kısım ilgili kosinüs fonksiyonunu açıklamaktadır. Sinüzoidal varyasyonu olan  $p$  miktarı:

$$p(t) = P \sin(\omega t + \phi) \quad (2.23)$$

$$p(t) = P e^{j(\omega t + \phi)} \quad (2.24)$$



**Şekil 2.3.** Kompleks düzlemde sinüzoidal dalgaya bağlı sanal kısım (Heutschi 2016)

Ses basıncı  $p$ , karmaşık olarak konuma bağlı genlik fonksiyonu  $P$  ve  $e^{j\omega t}$  salınım terimi olarak yazılmalıdır.

$$p(\text{konum}, t) = P(\text{konum}) e^{j\omega t} \quad (2.25)$$

$$\nabla p = \nabla P e^{j\omega t} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\omega^2 P(\text{konum}) e^{j\omega t} \quad (2.27)$$

Buradan üstteki Denklem 2.27 elde edilmektedir. Bu denklem dalga denkleminde yerine yazılırsa Helmholtz denklemi ortaya çıkmaktadır.

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (2.28)$$

Burada zaman ortadan kalkar ve denklemdeki dizi azalır. Dalga boyu  $k = \omega / c$ .

## 2.7. Sesin Miktarını Belirtmek

Desibel cinsinden ses basınç düzeyi,  $L_p = 20\log(p/p_0)$  olarak tanımlanmaktadır. Bu denklemde  $p$  ölçülen ses düzeyi,  $p_0$  ise standart olarak kabul edilen referans ses düzeyidir ( $20 \mu Pa$ ). Bu kısımda dikkat edilmesi gereken ses basıncının yanına, bir referansa göre belli bir düzeye sahip olduğunu belirten “düzey” kelimesinin eklenmesidir. Ses basınç düzeyinin sembolü  $L_p$ 'dir. Gürültü, frekans ve genlik ses seviyesi ile karakterize edilmektedir. Bir sesin genliğini tanımlamak için genellikle kök ortalama kare (rms) basıncı kullanılmaktadır.

$$p_{rms} = (\overline{p^2})^{1/2} \quad (2.29)$$

İlgilenilen akustik hedefin çok geniş bir aralıkta değişmesi probleminde bu ortalamaı almak zorlaşmaktadır. Sağlıklı insanda işitme eşiği  $p_{rms} = 20 \mu Pa$  iken, acı eşiği ve işitme hasarının başlangıcı  $p_{rms} \approx 200 \text{ mPa}$ 'dır. Bu sebeple sayıları yönetilebilir tutmak için logaritmik bir ölçek kullanılmaktadır. Bu ölçekte,  $p_1$  ve  $p_2$  arasındaki ses basıncı seviyesindeki fark Denklem 2.30'daki gibi belirlenmektedir.

$$\Delta_{SPL} = 10 \log_{10} \frac{\overline{p_1^2}}{\overline{p_2^2}} \quad (2.30)$$

Denklem 2.30'dan elde edilen ses basıncı seviyesi, Denklem 2.31 gibi olmaktadır.

$$SPL = 10 \log_{10} \frac{\overline{p^2}}{p_{ref}^2} \quad [\text{dB}] \quad (2.31)$$

Referans seviyesi, insan işitme duyusunun  $20 \mu Pa$  olduğu nominal eşiğidir. İnsanların bu seviyelere göre duyma hassasiyeti Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Farklı basıncı seviyelerinde insanların duyma hassasiyeti (Heutschi 2016)

Ses Basıncı Seviyesi Değişimi	Hassasiyet
$x < 2 \text{ dB}$	Duyulamaz
$2 < x < 4 \text{ dB}$	Duyulabilir
$5 < x < 10 \text{ dB}$	Açıkça duyulabilir
$x > 10 \text{ dB}$	İyi derecede duyulabilir

## 2.8. Ses Alanı Hesaplamaları

Genel olarak, ses alanı hesaplamaları, ilgilenilen ses alanı değişkenlerinin uzay-zaman bağımlılıklarını aramaktadır. Bu çözümler dalga denklemini ve duruma özgü sınır koşullarını yerine getirmelidir. Sınır koşulları, ses kaynakları ve ilgili empedanslar, olası yüzeylerin varlığı ile tanımlanmaktadır.

Genellikle çözümler, zaman alanında değil frekans alanında aranmaktadır. Frekans alanında çalışılması durumunda, dalga denklemi yerine Helmholtz denklemi kullanılabilir. Ses alanları için analitik çözümler sadece özel durumlar için bulunmaktadır. Genel durumda, Sonlu Elemanlar veya Sınır Elemanlar gibi stratejilere dayalı yaklaşımlar veya sayısal çözümler uygulanmaktadır.

### 2.8.1. Yansıma ve iletim

Bir ortamda dolaşan bir akustik dalga ikinci bir ortamın sınırıyla karşılaştığında, yansıyan ve iletilen dalgalar üretilmektedir. Hem gelen dalganın hem de ortam arasındaki sınırın düzlemsel olduğu ve tüm ortamların akışkan olduğu varsayıldığında bu olgunun tartışılması büyük ölçüde basitleştirilmiştir.

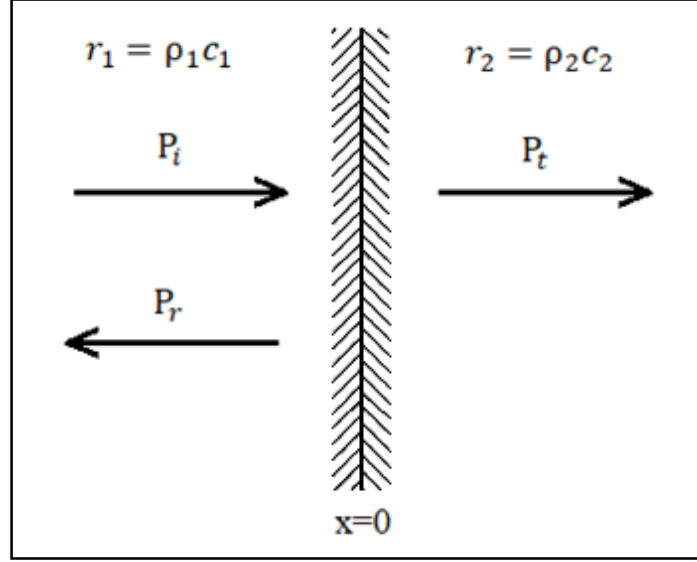
Yansıyan ve iletilen dalgaların basınç genliği, malzemelerin yoğunluğuna, karakteristik empedanslara, iki ortamdaki sesin hızlarına ve gelen dalganın ara yüzle yaptığı açıya bağlıdır. Gelen ve yansıyan dalgaların karakteristik empedanslı bir akışkanda dolaştığı düşünülürse,  $r_1 = \rho_1 c_1$  denklemi ortaya çıkmaktadır. İletilen dalganın karakteristik bir empedans sıvısı içerisinde hareket ettiği düşünülürse  $r_2 = \rho_2 c_2$  denklemi ortaya çıkmaktadır. Gelen dalganın karmaşık basınç genliği,  $P_i$ , yansıyan dalganın  $P_r$ , ve iletilen dalganın  $P_t$ 'dir. Basınç iletimi ve yansıma katsayıları bu şekilde tanımlanmaktadır (Kinsler ve ark. 1982).

$$T_i = \frac{I_t}{I_i} = \frac{r_1}{r_2} |T_i|^2 \quad (2.32)$$

$$R_i = I_r/I_i |R|^2 \quad (2.33)$$

Burada  $T_i$  iletim katsayısı ve  $R$  yansıma katsayısıdır. Bir harmonik düzlem dalganın yoğunluğu  $p^2/2r$  olduğundan, iletim ve yansıma katsayıları yoğunluğu olarak denklem

alttaki hali almaktadır. Gelen, yansıyan ve iletilen ses dalgaları şematik olarak Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yansıma ve iletim durumu (Kinsler ve ark. 1982)

$$T_i = P_t/P_i \quad (2.34)$$

$$R = P_r/P_i \quad (2.35)$$

Genel yansıma sorunu, bir ses dalgası bir nesneye yansıtıldığında ortaya çıkan ses alanı ile ilgilenmektedir. Ses dalgası uzunluğu nesnenin boyutlarından daha büyükse, yansıma işlemi genellikle saçılma olarak adlandırılmaktadır.

Matematiksel açıklamada, yansıtıcı veya saçılan nesne, nesne yüzeyinde bir sınır koşulu meydana getirmektedir. Bu, yüzey empedansı ( $p/\vec{v}_n$ ) ile tanımlanabilen lokal olarak reaksiyona giren yüzeyler için kolayca yapılmaktadır. Birçok malzeme yerel olarak reaksiyona giren yüzeyler olarak kullanılabilir. Öte yandan, malzemenin kendisinde, ilgili miktarda ses yayılımı ile genişleyen, reaksiyonlu yüzeyler gibi davranan yapılar bulunmaktadır (Heutschi 2016). Akustik olarak sert bir yüzeyin en basit durumu, sınır koşulunu basitleştirmektedir.

$$v_n = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2.36)$$

Denklem 2.36'da gösterilen  $v_n$  yüzeye dik ses parçacık hızı bileşeni ve  $\partial p/\partial n$  ses basıncının yüzeye dik yönde kısmi türevidir.

Yansıtıcı nesnenin dışında, ortaya çıkan ses alanının dalga denklemini yerine getirmesi gerekmektedir. Frekans bölgesi görünümüne, karşılık gelen koşul Helmholtz denklemidir. Elde edilen ses basıncı alanı  $\check{p}$ , bir tahrik alanı ve yansıyan (veya dağılık) bir parça bileşenine bölünmelidir. ( $P=\check{p}$ )

$$\check{p} = \check{p}_e + \check{p}_s \quad (2.37)$$

Genellikle dalganın geldiği bölge bilinmektedir ve sorun yansıyan bileşenlerin belirlenmesinde yatmaktadır. Toplam ses alanı  $\check{p}$  için Helmholtz denkleminin yerine getirilmesi gerekmektedir.

$$\nabla(\check{p}_e + \check{p}_s) + k^2(\check{p}_e + \check{p}_s) = 0 \quad (2.38a)$$

$$\nabla\check{p}_e + k^2\check{p}_e + \nabla\check{p}_s + k^2\check{p}_s = 0 \quad (2.38b)$$

Helmholtz denkleminin gelen dalgayı da sağlayabileceği de düşünülürse Denklem 2.39 ortaya çıkmaktadır.

$$\nabla\check{p}_s + k^2\check{p}_s = 0 \quad (2.39)$$

Buradan yansıyan dalganın da Helmholtz denklemini yerine getirmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Karşılıklı transfer ilkesi burada karşımıza çıkmaktadır. Ek olarak, yansıyan dalga nesnenin yüzeyindeki sınır koşulunu yerine getirmelidir. Akustik olarak sert bir cisim olması durumunda,  $\check{v}_n = 0$  olduğu anlamına gelmektedir. Ses basıncı ile düşünülürse, Denklem 2.40 ortaya çıkmaktadır.

$$\frac{\partial\check{p}_s}{\partial n} = j\omega\rho\check{v}_{n,e} \quad (2.40)$$

Ses dalgasının yayılımını, bulunduğu ortamın özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden bir ses dalgası, kesiti, malzeme özelliği veya sıcaklığı farklı olan bir ortama geçiş yaptığında ses enerjisinin bir kısmı kaynağa doğru geri döndüğünden, ilerlemeye devam eden dalganın enerjisi kayba uğramaktadır.

$$TL = 10 \log_{10} \left( \frac{W_t}{W_s} \right) \quad (2.41)$$

Denklem 2.41’de belirtilen TL ses iletim kaybıdır ve birimi dB’dir.  $W_s$  başlangıçta ki ses gücü ve  $W_t$  iletilen ses gücüdür.

Akustik dalga gücü ve üstteki denklem, düzlemsel dalgaların baskın olduğu düşük frekans bölgesinde, ses basıncı ile partikül hızının aynı fazda olmasından dolayı, ses basıncı üzerinden elde edilebilmektedir.

$$W_t = \frac{p^2 A_t}{Z_t} \quad (2.42)$$

$$TL = 10 \log_{10} \left( \frac{p_t}{p_s} \right) \quad (2.43)$$

### 2.8.2. Ses yutumu ve sesin azaltılması

Dalga denklemi, tüm akustik enerji kayıplarının ihmal edilebileceği varsayımıyla elde edilmiştir. Pek çok durumda, az miktarda olsa da yayılım vardır fakat ilgilenilen mesafeler veya zamanlar için bu yayılım göz ardı edilebilirse sonuçta tüm akustik enerji rastgele termal enerjiye dönüşmektedir. Bu yayılımın kaynakları ortama özgü olanlar ve ortamın sınırları ile ilişkili olanlar olmak üzere iki genel kategoriye ayrılmaktadır. Ortamdaki kayıplar, viskoz kayıplar, ısı iletim kayıpları ve iç moleküler işlemlerle bağlantılı kayıplar olmak üzere 3 temel tipe ayrılmaktadır (Kinsler ve ark. 1982).

Viskoz kayıplar, kayma deformasyonu veya bir ses dalgasının iletilmesine eşlik eden sıkıştırma ve genişlemeler gibi, ortamın bitişik kısımları arasında nispi bir hareket olduğunda meydana gelmektedir. Genel bir türevlemenin sonucu, dış kuvvetlerin yokluğunda, doğrusal olmayan Navier-Stokes denklemi üzerinden viskoz kayıplar incelenebilmektedir. Dış kuvvetlerin olduğu durum, ayrıntılı bir tensör analizi gerektirmektedir (Morse ve Ingard 1986). Dış kuvvetlerin olmadığı durumda viskoz kayıplar Denklem 2.44’teki gibi ifade edilmektedir.

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \left( \frac{4}{3} \eta + \eta_B \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) - \eta \nabla \times \nabla \times \vec{u} \quad (2.44)$$

Viskozite katsayılarının ( $\eta$  ve  $\eta_B$ ) birimleri pascal-saniyedir. (Pa.s) Kesme viskozitesi  $\eta$  katsayısı doğrudan ölçülebilmektedir. Kesme viskozitesi, farklı net hızlara sahip olan sıvının bölgeleri arasındaki moleküler çarpışmalarla oluşan momentum difüzyonunun bir ölçütüdür. Deneysel olarak, frekanstan bağımsız olduğu ve pratik olarak ilgilenilen fiziksel parametrelerdeki hemen hemen tüm akışkanların sıcaklığına bağlı olduğu görülmektedir. Akustik yayılımındaki sıcaklık dalgalanmalarının çok küçük olması nedeniyle,  $\eta$  sadece denge sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kabul edilmektedir.

Monotamik gazlarda  $\eta_B$  kütle katsayısı sıfırdır, ancak diğer akışkanlarda sonlu olabilir. Bu moleküler hareket, iç moleküler durumlar ve yapısal potansiyel enerji durumları arasındaki enerji dönüşümlerinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır.

Burada  $\eta \nabla \times \nabla \times \vec{u}$  terimi, türbülanslı akış, laminer akış, vorteks ve benzerlerini içeren akustik enerjinin dağılımlarını belirtmektedir. Bu etkiler, akustik dışı konularda önemli bir yer edinirken, doğrusal akustikte genellikle kenarların yakınındaki küçük bölgelerle sınırlıdır ve daha az önem taşımaktadır.

Bu viskoz işlemlerde, akışkanın yoğunluğu ve sıcaklığı bir genişleme veya sıkıştırma ile değiştirildiğinde, sistemin dengeye yaklaşması zaman almaktadır. Bu gecikmeler, akustik enerjinin rastgele termal enerjiye dönüşümünü sağlamaktadır.

Isı iletimi kayıpları, termal enerjinin yüksek sıcaklıktaki yoğunlaşmalardan daha düşük sıcaklıklara iletilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu kısımda termal emilim fiziksel argümanlara göre daha sezgisel olarak geliştirilmiştir. Hesaplama kolaylığı için, geliştirme mükemmel gazlarla sınırlandırılmıştır. Bir akışkanın akustik bir yüke maruz kalması durumunda, sıkıştırılmış bölgeler diğer bölgelere göre daha yüksek sıcaklıklara sahip olmaktadır.

Eğer açısız frekans  $\omega$ , a düzlem dalgası  $p$  ve  $+X$  yönünde hareket eden ilerleme sabiti  $k$  alınırsa o zaman mutlak sıcaklık  $T_{eq}$  değerine sahip kayıpsız bir mükemmel gaz için sıcaklık Denklem 2.45 gibi olmaktadır.

$$T = T_{eq} + T_{eq}(\gamma - 1)s \quad (2.45)$$

Bu kısımda  $s = p/\rho_0 c^2$ 'dir. Basınç genliği  $P$  olan bir dalga için, sıcaklık dalgalanmasının büyüklüğü ise Denklem 2.46'daki gibi olmaktadır.

$$|T - T_{eq}| = T_{eq}(\gamma - 1)P/\rho_0 c^2 \quad (2.46)$$

Kayıp bir gazda, sıcaklık dalgalanmasının genliği, basınç genliği gibi azalmaktadır. Kinetik teoride, mükemmel bir gaz çevriminin kinetik enerjisi sıcaklıkla orantılıdır. Sıcak bölgelerdeki moleküller, moleküller arası çarpışmalar yoluyla yayıldığı çevresindeki soğutucu bölgelere göre daha büyük kinetik enerjilere sahiptir. Enerji yayılma yoluyla bölgeden ayrıldıkça, akustik olarak kaybedilir ve moleküler hareket rastgele termal enerjiye dönüştürülmektedir. Termal enerjideki değişiklik, sıcaklıktaki değişim ile ilgilidir.

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.47)$$

Denklem 2.47'de  $c_p$  [J/(kg.K)] sabit basınçtaki özgül ısı ve  $\Delta q$  termal enerji kazanımı olarak tanımlanmaktadır. İletim işlemi, sıcaklık için alttaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c_p \rho_0} \nabla^2 T \quad (2.48)$$

Denklem 2.48'de  $k$  ısı iletimini temsil eden katsayıdır ve birimi  $W/(mK)$ 'dir. Üstteki iki denklem birleştirilirse alttaki denklem elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = k \nabla^2 T \quad (2.49)$$

Denklem 2.49'un gaz hacmine entegrasyonu, hacimdeki anlık akustik enerji kaybı oranını vermektedir. Hareketin bir süresi boyunca geçen zaman ortalaması, ortalama akustik enerji kaybı oranını vermektedir.

Kayıpsız akustik yaklaşımı bu denklemde kullanılamaz. Bunun yerine, denklemin sağ tarafı kısmi türevli biçimde ifade edilmektedir.

$$\nabla^2 T = \frac{1}{T} \nabla T \cdot \nabla T + T \nabla \left( \frac{1}{T} \nabla T \right) \quad (2.50)$$



Doğrusal akustik yaklaşımlarla uyumlu olarak, paydalardaki  $T$ 'lere denge sıcaklığı  $T_{eq}$  ile yaklaşılabilmektedir. Sağdaki ikinci terim, zaman ortalaması sıfır olan bir terimdir. Sağdaki ilk terim hiçbir zaman olumsuz değildir ve akustik dalgadan kaybedilen enerjinin zaman içindeki birikimini temsil etmektedir. Akustik enerji yoğunluğundaki (zaman ortalaması alınmış) değişim oranı alttaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{1}{V} \int_V \frac{\Delta q}{\Delta t} dV = -\frac{k}{T_{eq}} \frac{1}{V} \int_V \nabla T \cdot \nabla T dV \quad (2.51)$$

Ekseni akustik dalganın yayılma vektörüne paralel olacak şekilde kesit alanı  $S$  ve uzunluğu  $\lambda = 2\pi/k$  olan bir silindirik hacim  $V$  düşünülürse, akustik dalgadan ısı enerjisinin kaybedilme hızı bulunmaktadır.  $X$  üzerinden entegrasyon ve hareketin bir periyodunun ortalaması alındığında Denklem 2.52 elde edilmektedir.

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{k}{T_{eq}} \frac{S}{V} \int_0^\lambda \nabla T \cdot \nabla T dx = -\frac{1}{2} k T_{eq} (\gamma - 1)^2 \left( \frac{kP}{\rho_0 c^2} \right)^2 \quad (2.52)$$

Yutum katsayısı  $(d\mathcal{E}/dt)/\mathcal{E} = -2\alpha_k c$  denkleminde bulunur. Dalga için düşünülürse  $\mathcal{E} = \frac{1}{2} p^2 / \rho_0 c^2$  'dir. İdeal gazlarda  $T_{eq} (\gamma - 1) = c^2 / c_p$  olarak çıkarılır ve burada yutum katsayısı için ısı iletimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Kinsler ve ark. 1982).

$$\alpha_k = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \frac{(\gamma - 1)k}{c_p} \quad (2.53)$$

Bu yutum katsayısı, viskoz yutum için olanla aynı frekans bağımlılığına sahiptir. Ses yutumuna yol açan moleküler işlemler, moleküllerin kinetik enerjisinin depolanmış potansiyel enerjiye dönüştürülmesini içermektedir. Isının iletimi arttıkça ısı yoluyla ses yutumunun arttığı bu denklemde görülmektedir. Çalışmanın deneysel kısmıyla ilgili teorik bilgiyi sağlayan en önemli kısımlardan birisi bu noktadır.

Gazlar için, ısı iletimi ile bağlantılı yutum, viskoz yutum için olandan daha azdır. Çoğu metalik olmayan sıvılar için, ısı iletkenliği ile üretilen yutum, viskoziteye göre ihmal edilebilmektedir. Kayıplar küçük olduğunda, makul ve akustik kayıpların bağımsız kaynakları için toplam yutum katsayısının, bireysel kayıp mekanizmalarının yutum katsayılarının toplamı olduğu gösterilebilir.

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \quad (2.54)$$

Keyfi bir yüzeye çarpan ses dalgaları yansıtılır, iletilir veya yutulur. Yansıma, iletme veya yutma enerji miktarı, yüzeyin akustik özelliklerine bağlıdır. Yutulan ses iletilebilir veya dağıtılabılır. Ses emicileri, ses enerjisini dağıtmak ve yansımalarını en aza indirmek için kullanılmaktadır (Cox ve D'Antonio 2004).

Ses yutum katsayısı ölçümlerinde kullanılan yaygın metot, empedans tüpünde yapılan ses şiddeti ölçümleridir. Ses yutum katsayısı, basit olarak emilen dalganın kaynaktan gelen dalgaya oranı olarak tanımlanmaktadır. Yutum katsayısı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\alpha = 1 - \frac{I_R}{I_I} \quad (2.55)$$

Daha detaylı olarak incelenirse, empedans tüpünün bir ucunda bir sinüzoidal dalga oluşturulmaktadır ve bu dalga numuneyi geçince tüpün diğer ucunda geri yansımaktadır. Her iki dalga ise duran ve maksimum basınç genlikli bir dalga oluşturmaktadır. ( $\lambda/2$  ve  $\lambda$  = akustik dalga boyu) Emilim katsayısını belirlemek için sabit dalga oranı  $q = p_{maks}/p_{min}$ , hareketli bir prob mikrofonu ile ölçülmektedir. Burada  $p_{maks}$  ve  $p_{min}$ , duran dalgadaki maksimum ve minimum basınç genliğidir (Crocker ve diğ. 2007).

$$\alpha = \frac{4q}{(1+q)^2} \quad (2.56)$$

Ses yutum katsayısı hesabında geçen ses hızı, Denklem 2.57 yardımıyla hesaplanmaktadır.  $T$ , sıcaklık (K),  $c_0$ , ses hızıdır (m/s). Ses hızı hesaplandıktan sonra dalga boyu da aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$c_0 = 343,24\sqrt{T/293} \quad \text{ve} \quad \lambda_0 = c_0/f \quad (2.57)$$

Kalibrasyon faktörünün belirlenmesi işlemi için bütün birbirini takip eden başarılı ölçümlere göre geçerli düzeltmelerden elde edilen sonuçlar model halinde işleme dahil edilmelidir. Aynı matematiksel işlemler kullanılarak, tüpteki numune üzerindeki güçlü

akustik yansımaları engelleyebilmek için  $H_{12}^I$  ve  $H_{12}^{II}$  ölçülmektedir. Kalibrasyon faktörü  $H_C$ , transfer fonksiyonu  $H_{12}^{II}$  kullanılarak Denklem 2.58'deki gibi hesaplanmaktadır (Aydın ve Batmaz, 2012, ISO 10534-2, 1998).

$$H_C = (H_{12}^I \cdot H_{12}^{II})^{1/2} = H_C(e)^{j\phi_c} \quad (2.58)$$

Sistemdeki mikrofonların, ilk konum transfer fonksiyonu  $H_{12}$  ve yer değişimi sonrası transfer fonksiyonu  $H_{12}^{II}$  olarak belirtilmektedir. Kalibrasyon faktörü ve mikrofonların yer değiştirmesi ile tespit edilen transfer fonksiyonları hesaplanmalıdır. Daha sonra ölçümlere devam edilerek karmaşık transfer fonksiyonları çözümlenmelidir (ISO 10534-2, 1998).

$$\hat{H}_{12} = |\hat{H}_{12}|(e)^{j\phi} = \hat{H}_r + j\hat{H}_i \quad (2.59)$$

Burada,  $\hat{H}_{12}$ , doğrulanmamış transfer fonksiyonu,  $\phi$ , doğrulanmamış faz açısı,  $\hat{H}_r$ ,  $\hat{H}_{12}$ 'nin gerçek kısmı,  $\hat{H}_i$ , sanal kısmıdır. Mikrofonlardaki uygunsuzlukları gidermek için Denklem 2.60 kullanılmaktadır.

$$H_{12} = |H_{12}|(e)^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_C} \quad (2.60)$$

Gelen dalganın yansımaya faktörü Denklem 2.61 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$r = |r|(e)^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}}(e)^{2jk_0x_1} \quad (2.61)$$

Burada,  $r_r$ , gerçek bileşen,  $r_i$ , sanal bileşen,  $x_1$ , testnumunesi ile uzak mikrofon arasındaki mesafe,  $\phi_r$ , yansımaya faktörünün faz açısı,  $H_I$ , gelen ses dalgasının transfer fonksiyonu,  $H_R$ , yansıyan ses dalgasının transfer fonksiyonudur. Ses yutma katsayısının belirlenmesinde Denklem 2.62'den yararlanılmaktadır (ISO 10534-2, 1998).

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (2.62)$$

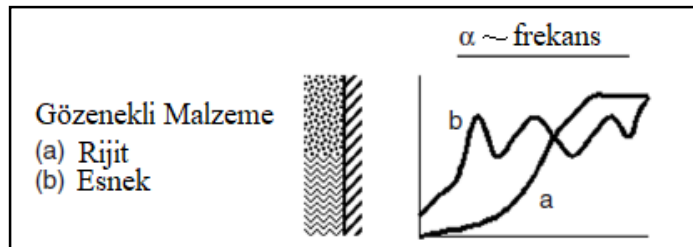
Gözenekli emiciler genellikle cam elyaflarından, organik elyaflardan veya açık köpükten yapılmaktadır. Ek 3'te literatürde yer alan bazı malzemelere ait ses yutum katsayıları gösterilmektedir. Hava, gözeneklerde ileri geri hareket ettiğinde sürtünme kayıpları nedeniyle emici olarak işlev görmektedir. İlgili ses alanı değişkeni bu nedenle ses parçacık hızıdır ( $v_n$ ). Akustik olarak zor bir sınıra, belirli bir mesafeye sahip gözenekli bir emici kullanmak yararlıdır.

### 2.8.3. Akustik Biot parametreleri

Malzemelerin akustik performansını etkileyen bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler Biot parametresi olarak adlandırılmaktadır. Malzemenin özellikleri katı ve akışkan olmak üzere iki farklı faz olarak incelenmektedir. Burada katı faz malzemenin kendisi, akışkan faz ise hava olarak sınırlandırılan alandır. Akışkan ve katı fazlar akustik parametreler ile ilişkilidir. Katı faz tek başına iken sadece yapısal parametreler ile ilişkilidir.

Ses yutum katsayısının belirlenmesini katı ve akışkan fazlar birlikte etkilemektedir. Ses iletim kaybında ise havanın malzeme içerisine nüfuz etmesi istenmediği için katı faz etkin olmaktadır. Bu parametreler aşağıdaki kısımda incelenecektir.

Gözeneklilik, malzeme içerisinde bulunan boşlukların malzemenin tamamına olan oranını belirten bir parametredir. Malzeme gözenekliliğinin artması, ses yutum katsayısını arttıran en önemli özelliktir (Champoux ve ark. 1991). Gözenekli malzemelerin ses yutum eğrisi davranışları Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Gözenekli malzemelerin ses yutum eğrisi davranışları (Crocker ve Sommerfeldt, 2008)

Hava akımı direnci, numunenin iki yüzü arasındaki basınç düşüşü ile numunenin kendisinden geçen akış hızı arasındaki orandır. ISO 9053 standardına göre bir hava akımı, bir tüpe yerleştirilmiş gözenekli bir malzeme numunesinden geçtiğinde, numunenin iki tarafı arasında bir basınç farkı belirmektedir (Anonim 1991b). Kıvrımlılık, parça içerisinde akışkanın izlediği yolu belirlemektedir. Sabit bir hava akışı düz bir gözenekli malzeme numunesinden geçtiğinde, gözeneklerin geometrisinin karmaşıklığı, akışkan parçacıklarını düz olmayan bir yol izlemeye zorlamaktadır (Johnson ve ark. 1987).

Viskoz uzunluk, gözenekli bir malzemenin içindeki viskoz sürtünme dağılım mekanizmasına bağlıdır (Johnson ve ark. 1987). Termal uzunluk, termal dağıtım mekanizmasına, yani malzeme çerçevesi ile onu doygun hale getiren akışkan arasındaki değişimlere bağlıdır (Lafarge ve ark. 1997).

Young modülü, bir nesnenin veya maddenin üzerine bir kuvvet uygulandığında elastik olarak deforme olma eğiliminin matematiksel tanımıdır. Sönüm oranı, enerji emilimini ifade eden bir ölçüdür. Titreşim periyodunda enerji kaybı ile maksimum geri dönüşümlü enerji arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Poisson oranı, bir malzeme içerisinde yer alan yatay yönlü gerilmelerin dikey yönlü gerilmelere olan oranı olarak tanımlanmaktadır.

#### **2.8.4. Ses alanı hesaplamaları için sonlu elemanlar metodu uygulamaları**

Birçok disiplinde olduğu gibi, sonlu elemanlar metodu ses alanı hesaplamaları için başarıyla uygulanabilir. Sonlu elemanlar yöntemi özellikle sınırlı alanlar için çok uygundur, ancak sonlu elemanların yanı sıra sonsuz elemanlar da kullanılmaktadır (Dhatt ve Touzot 1984).

Aşağıda, sonlu elemanlar yönteminin prensipleri genel 3 boyutlu sınırlı bir alan için tanıtılmıştır. İlgilenilen ses alanı değişkeni genellikle ses basıncıdır. Zaman bağımlılığının  $\omega$  açısız frekanslı sinüzoidal olduğu varsayılmaktadır. Sonuç olarak, ses alanının araştırılması, konumun bir fonksiyonu olarak karmaşık genlik  $P$ 'nin belirlenmesine indirgenmektedir (Heutschi 2016).

Genel problem, Helmholtz denklemi ve aşağıdaki üç olası sınır koşulu ile formüle edilmektedir.

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad S_1 \text{ yüzeyi üzerinde} \quad (2.63)$$

$$P = \bar{p} \quad S_1 \text{ yüzeyi üzerinde} \quad (2.64)$$

$$\tilde{v}_n = \bar{v}_n \rightarrow \frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} = -j\omega\rho\tilde{v}_n \quad S_2 \text{ yüzeyi üzerinde} \quad (2.65)$$

$$\frac{\tilde{v}_n}{\tilde{p}} = A_n = \frac{1}{Z_n} \rightarrow \frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} = -j\omega\rho A_n \tilde{p} \quad S_3 \text{ yüzeyi üzerinde} \quad (2.66)$$

Denklem 2.63'te gösterilen  $k = \omega/c$  'dir. Denklem 2.64'te gösterilen  $\bar{p}$ , önceden tanımlanmış ses basıncıdır. Denklem 2.64 ve Denklem 2.65'de gösterilen  $\bar{v}_n$ , ses parçacık hızının önceden tanımlanmış normal bileşenidir. Denklem 2.66'da gösterilen  $A_n$ , önceden tanımlanmış giriş yüzeyi,  $Z_n$ , önceden tanımlanmış empedanstır.

$S_1$ ,  $S_2$  ve  $S_3$ , alanlarının toplamı hacmi tamamen kaplayan, toplam S yüzeyini oluşturmaktadır. Sonlu elemanlar prosedürüyle, gerçek basınç  $\tilde{p}$  için yaklaşık bir  $\tilde{p}'$  çözümü aranmaktadır. Yaklaşımın kalitesi, gerçek ve nominal değerler arasındaki farklara karşılık gelen kalanların yardımı ile ölçülmektedir.

$$R_V = \nabla^2 \tilde{p}' + k^2 \tilde{p}' \quad (2.67)$$

$$R_{S_1} = \bar{p} - \tilde{p}' \quad (2.68)$$

$$R_{S_2} = -\frac{\partial \tilde{p}'}{\partial n} - j\omega\rho\tilde{v}_n \quad (2.69)$$

$$R_{S_3} = -\frac{\partial \tilde{p}'}{\partial n} - j\omega\rho A_n \tilde{v}_n \quad (2.70)$$

Yukarıdaki Denklem 2.67'de gösterilen  $R_V$  düşünülen V hacmi için kalandır. Denklem 2.68'de gösterilen  $R_{S_1}$  önceden tanımlanmış ses basıncı  $\bar{p}$  olan  $S_1$  yüzeyi için kalandır. Denklem 2.69'da gösterilen  $R_{S_2}$  ses partikül hızı  $\bar{v}_n$ 'in önceden tanımlanmış normal bileşeni olan  $S_2$  yüzeyi için kalandır. Denklem 2.70'te gösterilen  $R_{S_3}$  önceden tanımlanmış giriş izni olan  $S_3$  yüzeyi için kalandır.

Yaklaşık  $\tilde{p}'$ , kalanların kaybolan ağırlıklı ortalama toplamının koşulu aranmaktadır.

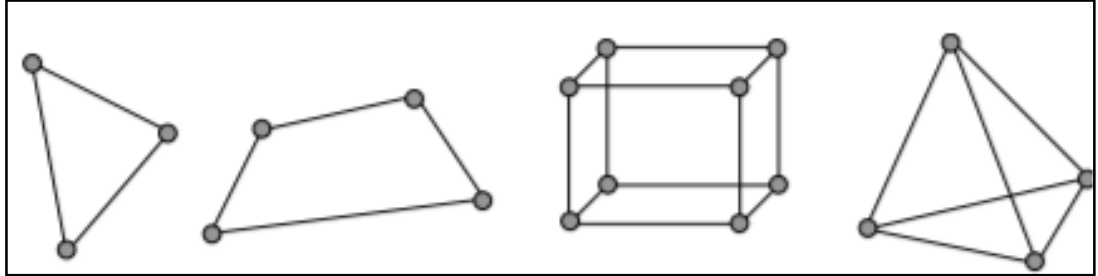
$$\int_V WR_V dV + \int_{S_1} WR_{S_1} dS + \int_{S_2} WR_{S_2} dS + \int_{S_3} WR_{S_3} dS = 0 \quad (2.71)$$

Denklem 2.71'de W, ağırlık fonksiyonudur.

Eğer  $S_1$  yüzeyinde sınır şartı ses basıncı olarak seçilirse ve üstteki eşitlikler yerini alırsa denklem alttaki halini almaktadır.

$$\int_V W \nabla^2 \tilde{p}' dV + \int_V W k^2 \tilde{p}' dV - \int_{S_2} W \left( \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial n} + j\omega \rho \tilde{v}_n \right) dS - \int_{S_3} W \left( \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial n} + j\omega \rho A_n \tilde{v}_n \right) dS = 0$$

Bir sonraki adım, ayırıklaştırmadır. Bu kısımda ilgili bölge küçük alanlara bölünmüştür. Bu elemanların boyutları değişebilir ve Şekil 2.6'da görüldüğü gibi farklı şekillerde olabilirler. Uygun eleman seçimi ile, ilgilenilen geometriye optimal bir adaptasyon mümkündür.



**Şekil 2.6.** Sonlu eleman şekilleri (Heutschi 2016)

Bir eleman ilgilenilen alan bölgesinin küçük bir bölümünü tarif etmektedir. Üç boyutta bunlar küpler, tetrahedronlar ve iki boyutlu modeller için üçgen ve dörtgen formunda olabilirler. Bir eleman, genellikle köşelerde bulunan düğümlerle tanımlanmaktadır.

Elemanlar tüm simülasyon bölgesini kapsamalıdır. Bazı öğeler ortak bir sınırı paylaşıırken, bazıları aynı düğümlere sahiptir. Her  $M$  elemanı için, interpolasyon fonksiyonları veya şekil fonksiyonları olarak adlandırılan  $N_i$ ,  $M$ 'nin eleman düğümlerinin sayısına karşılık geldiği yerde belirlenmektedir. İnterpolasyon fonksiyonları  $N_i$ , lokasyona bağlıdır ve eleman içindeki  $\tilde{p}'$  alan değişkenini düğümlerdeki değerlerden

tanımlamaktadır. Elemanın dışında  $N_i$  işlevleri kaybolmaktadır. Denklem 2.72’de gösterilen  $\tilde{p}_i'$  düğümdeki ses basıncı ve  $N_i(x, y, z)$  interpolasyon fonksiyonudur.

$$\tilde{p}'(x, y, z) = \sum_{i=1}^M \tilde{p}_i' N_i(x, y, z) \quad (2.72)$$

Yukarıda da belirtildiği gibi, sonlu elemanlar yöntemi sınırlı alanlar için çok uygundur. Açık alanlarda ses alanı hesaplamaları sonsuz elemanlar kullanılarak elde edilmektedir (Burnett 1994). Sınırlandırılmamış alanlar için alternatif bir yaklaşım (bu, hiçbir şeyin geri yansıtılmadığı anlamına gelir), sınır koşullarının serbest alan empedansı  $Z = \rho c$ 'ye tekabül ettiği keyfi bir sınırın getirilmesidir. Düzlem dalgaları için bu iyi çalışmaktadır, ancak genel durumda, bazı yansıtılmış ses enerjisiyle sonuçlanan belirli bir empedans süreksizliği ortaya çıkmaktadır.

Sonlu elemanlar kavramı içerisinde yerel olarak değişen ortam özelliklerini ve dolayısıyla yayılma koşullarını hesaba katmak mümkündür (Burnett ve Holford 1998).

## 2.9. Akustik Ölçümler

Akustik bir işlemin tam açıklaması, her noktada ses basıncı ve ses partikül hızının zaman geçişinin özelliklerini içermektedir. Çoğu zaman ses alanı incelemelerinde değişken ses basıncı araştırılmaktadır. Ses basıncının ölçülmesi, ses parçacık hızından çok daha kolaydır. Ses basıncı için, akustik sinyali elektriksel bir sinyale mikrofonlar dönüştürmektedir.

Akustik ölçümlerde kullanılan en yaygın miktarlar, ses basıncı karesinin zamana bağlı entegrasyonlarıdır (Heutschi 2016). En yüksek değerler ve istatistiksel nicelikler sadece küçük bir rol oynamaktadır. Ses basıncı zamanındaki entegrasyonun anlamsız olduğu unutulmamalıdır, çünkü bu miktar ortalama olarak 0 vermektedir. Ses basıncı karesinin entegrasyonu, sinyalin enerjisi veya gücü için bir ölçü olarak yorumlanabilir. Buradan anlık ses basıncı seviyesi Denklem 2.73’teki gibi ifade edilmektedir.

$$L(t) = 10 \log \left( \frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} e^{\frac{\tau-t}{RC}} d\tau \right) \quad [dB] \quad (2.73)$$



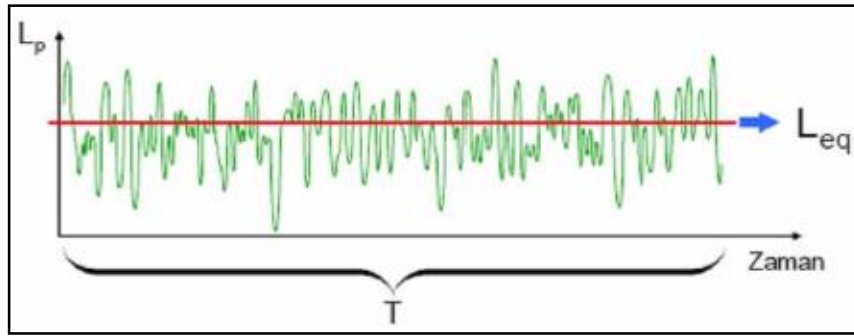
Denklem 2.67’de ifade edilen  $RC$  zaman sabiti,  $p(\tau)$  anlık ses basıncı ve  $p_0$  ( $2 \times 10^{-5}$  Pa) referans ses basıncıdır. Denklem 2.74’te ise eşdeğer sürekli ses basıncı seviyesi  $L_{eq}$  gösterilmektedir.

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right) \quad [dB] \quad (2.74)$$

Denklem 2.68’de ifade edilen  $T$  ölçüm zaman aralığı,  $p(\tau)$  anlık ses basıncı ve  $p_0$  referans ses basıncıdır. Denklem 2.75’te sese maruz kalınan basınç seviyesi  $L_E$  gösterilmektedir.

$$L_E = 10 \log \left( \frac{1}{1sec} \int_0^T \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right) \quad [dB] \quad (2.75)$$

Denklem 2.75’te ifade edilen  $T$  ölçüm zaman aralığı,  $p(\tau)$  anlık ses basıncı ve  $p_0$  referans ses basıncıdır. Şekil 2.7’de yer alan grafik bu hesaplamayı açıklamaktadır.



**Şekil 2.7.** Eşdeğer sürekli ses düzeyinin matematiksel olarak hesaplanması (Fahy 1989)

### 2.9.1. Filtreler

Sinyalin frekans kompozisyonunu dikkate almak çoğu zaman tercih edilmektedir. Bu nedenle, akustik ölçümlere sıklıkla uygun bir frekans ağırlıklandırması uygulamak veya analiz için sınırlı bir frekans aralığı seçmek için filtreler kullanılmaktadır. Yukarıda verilen sinyal özellikleri daha sonra filtrelenmiş sinyaller için aynı şekilde uygulanabilir.

İnsan işitme duyusunun duyarlılığı, sık sık frekansa bağlıdır. Bu nedenle kulağın frekans tepkisini simüle etmek için frekans ağırlıklandırma filtreleri tanımlanmıştır. Kulağın frekans tepkisinin ses basıncı seviyesine bağlı olması ciddi bir zorluktur. Düşük seviyelerde, frekans bağımlılığı daha yüksek seviyelerden daha belirgindir. Bu nedenle başlangıçta birkaç filtre tanımlanmıştır ve ISO Norm 10845 ve ISO Norm 14938’e göre

$A$ ,  $B$  ve  $C$  isimlerini almışlardır (Anonim 1995b, Anonim 1998b).  $A$  filtresi düşük seviyeler,  $B$  filtresi orta seviyeler ve  $C$  filtresi yüksek seviyeler için tasarlanmıştır.  $B$  filtresi sık kullanılmamasından dolayı tamamen kaybolmuştur. Günümüzde en sık kullanılan  $A$  filtresidir,  $C$  filtresi sadece özel durumlarda uygulanmaktadır.  $A$  filtresi ile yapılan değerlendirmeler  $dB(A)$  birimi ile etiketlenmiştir. IEC Standard 61672'e göre  $C$ -*filtresi* için transfer fonksiyonu Denklem 2.76'daki gibi gösterilmektedir (Anonim 2002).

$$T_{C-Filtresi}(s) = \frac{Ks^2}{(s + \omega_1)^2(s + \omega_2)^2} \quad (2.76)$$

Denklem 2.76'da ifade edilen  $\omega_1 = 1,29 \times 10^2$  [rad/sec] ve  $\omega_2 = 7,67 \times 10^4$  [rad/sec] değerlerine sahiptir.

Burada Hz cinsinden frekans  $f$  olduğunda,  $C$  filtresinin transfer fonksiyonunun  $dB$  cinsinden genliği Denklem 2.77'de gösterilmektedir.

$$C_{agr} = 20 \log \left( \frac{1.498 \times 10^8 f^2}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)} \right) \quad (2.77)$$

$A$  filtresinin transfer fonksiyonu,  $C$  filtresinden birine karşılık gelir, ancak başlangıçtaki iki sıfır ve iki basit kutup ile tamamlanmaktadır. Denklem 2.78'de  $A$  filtresinin transfer fonksiyonu gösterilmektedir.

$$T_{A-Filtresi}(s) = \frac{Ks^4}{(s + \omega_1)^2(s + \omega_2)^2(s + \omega_3)(s + \omega_4)} \quad (2.78)$$

Denklem 2.78'de ifade edilen  $\omega_1 = 1,29 \times 10^2$  (rad/sec),  $\omega_2 = 7,67 \times 10^4$  (rad/sec),  $\omega_3 = 6,77 \times 10^2$  (rad/sec) ve  $\omega_4 = 4,64 \times 10^3$  (rad/sec) değerlerine sahiptir.

$$A_{agr} = 20 \log \left( \frac{1.873 \times 10^8 f^4}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)\sqrt{f^2 + 107.7^2}\sqrt{f^2 + 737.9^2}} \right) \quad (2.79)$$

Frekans analizi işlemi, belirli bir frekans bandında bulunan sinyal katkılarını değerlendirmektedir. Tam bir analiz için, ilgilenilen tüm frekans aralığı, birbirlerini kesintisiz olarak takip eden bir dizi gruba bölünmektedir. Yukarıda tartışılan sinyal özellikleri daha sonra her bir bant için ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Frekans eksenini farklı şekillerde bölünebilir. Akustik uygulamalar için doğrusal ve logaritmik bölme çok

yaygındır. Doğrusal bir bölme, sabit mutlak bant genişliğine sahip filtrelerle sonuçlanır, logaritmik bölme, sabit göreceli bant genişliğine sahip filtrelere karşılık gelmektedir.

Sabit bağıl bant genişliğine sahip filtreler, filtrenin merkez frekansı  $f_m$  ile orantılı olan bir genişliğe  $B$  sahiptir. Standart bir temel olarak 1 kHz'lik bir merkez frekansı tanımlanmaktadır. Bununla komple seri geliştirilebilir.

$$B = f_m g \quad (2.80)$$

Denklem 2.80'de gösterilen  $B$  bant genişliği,  $f_m$  filtrenin merkez frekansı ve  $g$  sabit olarak yer almaktadır.

Bant genişliği, logaritmik olarak merkez frekansın etrafına dağılmıştır.

$$f_o = f_m h \quad (2.81)$$

$$f_u = f_m \frac{1}{h} \quad (2.82)$$

$$f_o - f_u = B \quad (2.83)$$

$$g = h - \frac{1}{h} \quad (2.84)$$

Denklem 2.81 ve Denklem 2.82'de belirtilen  $f_o$  frekansın en üst limitidir. Denklem 2.83 ve Denklem 2.84'te belirtilen  $f_u$  frekansın en alt limitidir. Denklem 2.82 ve Denklem 2.84'te belirtilen  $h$  sabit olarak yer almaktadır. Filtrelerin birbirini sorunsuz şekilde takip etmesi şartına göre  $n$  ve  $n + 1$  şeklinde olması gerekmektedir.

$$f_{o,n} = f_{u,n+1} \text{ veya } \frac{f_{m,n+1}}{f_{m,n}} = h^2 \quad (2.85)$$

Denklem 2.85'e göre merkez frekansları düşünülürse Denklem 2.86 elde edilecektir.

$$f_{m,n} = 1000(h^2)^n \quad n \text{ serisi} = \dots - 3 - 2 - 1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \dots \text{ için} \quad (2.86)$$

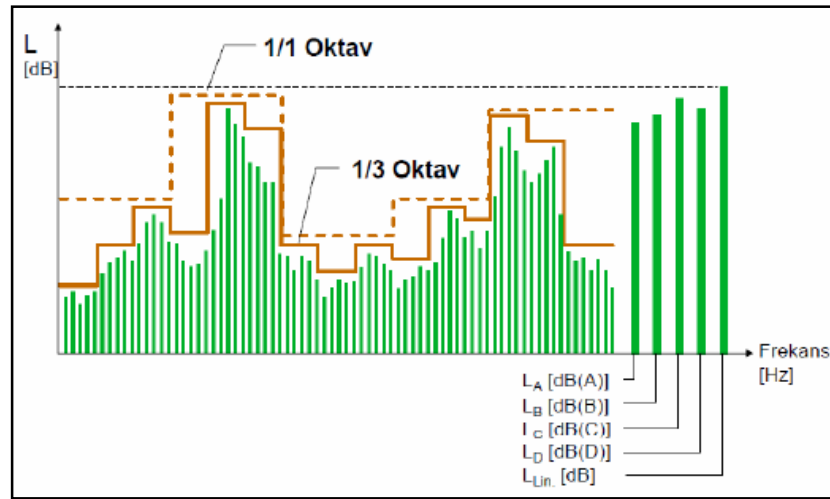
IEC 61260 standardına göre bu tipteki en önemli filtreler oktav ve üçüncü oktav filtreleridir (Anonim 1995a). Üçüncü oktav bantları, frekans ekseninin bu bölümünün

insan algısı (kritik bantlar) ile ilgili olması nedeniyle özel ilgi konusudur.  $g$  ve  $h$  sabitleri Çizelge 2.2'ye göre seçilmelidir.

**Çizelge 2.2.** Oktav ve üçüncü oktav filtreleri için  $g$  ve  $h$  sabitlerinin değerleri

	$g$	$h$	$h^2$
Oktav filtresi	0,707	$\frac{1}{2^2}$	2
Üçüncü oktav filtresi	0,232	$\frac{1}{2^6}$	$\frac{1}{2^3}$

Farklı filtrelerin karşılaştırılması Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Oktav filtreleri, merkez frekansının yaklaşık %70'i bir bant genişliğine sahiptir. Üçüncü oktav filtresinin bant genişliği merkez frekansının yaklaşık %23'ü kadardır. Filtrelerin dikliğinin sonlu olduğu, yani birkaç bandın dar bant sinyalleri durumunda bile bir yanıt gösterdiği anlamına geldiğine dikkat edilmelidir.

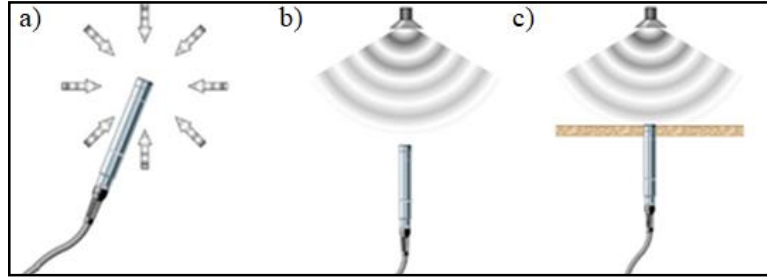


**Şekil 2.8.** Farklı oktav bant filtrelerinin karşılaştırılması (Fahy 1989)

Günümüzde üçüncü oktav bantlarındaki farklı sinyal niteliklerini gerçek zamanlı olarak aynı anda değerlendirebilen frekans analizörleri bulunmaktadır. Sabit mutlak bant genişliğine sahip filtreler, merkez frekansından bağımsız olarak sabit bir bant genişliğine sahiptir. FFT analizörlerinin yanı sıra birkaç Hz'lik tipik bant genişliğine sahip dar bant filtreleri de bu kategoriye girmektedir. Bu tür bir analiz, saf tonlu sinyalin bileşeninin sıklığının araştırılması gibi teknik işler için kullanılmaktadır.

## 2.9.2. Mikrofonlar

Mikrofonlar, akustik bir sinyali elektriksel bir sinyale dönüştüren dönüştürücülerdir. Ölçüm amacıyla sadece çok yönlü basınca duyarlı mikrofonlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek frekanslara doğru, eğer ses dalgası uzunluğu, mikrofon çapı ile aynı büyüklükte ise, basınç mikrofonları çok yönlülüğünü yitirmektedir. Bu bir üst frekans limitini tanımlamaktadır. Mikrofona normal zar yönünde vuran yüksek frekanslı ses dalgaları, normalde bir artışa karşılık gelen bir basınç yığını oluşturmaktadır. Bu sapma düz frekans cevabından 10 dB kadar değişebilmektedir. Bu tür bir mikrofon, dalga yayılımının gerçekleşmediği küçük boşluklarda fazla önlem alınmadan kullanılabilir. Sonuç olarak, bu mikrofonlara basınç tepkisi tipleri denilmektedir. Bir rastgele etki alanı mikrofonu, ses alanlarının ölçülmesi içindir, burada ses birçok yönden gelmektedir; bir yankılanma odasında veya diğer yüksek derecede yansıtıcı ortamlarda ölçüm yaparken bu mikrofon tipleri kullanılmaktadır. Mikrofon tiplerine ait bir karşılaştırma Şekil 2.9'da yer almaktadır.



Şekil 2.9. a) Rastgele etki alanı b) serbest alan c) basınç mikrofon tipleri (Anonim 2019c)

Mikrofonlar, normal ses yönünde, uygun frekansa bağlı zayıflama ile çalışmak üzere tasarlanabilmektedir. Bu mikrofonlara serbest alan cevap tipi mikrofonlar denilmektedir. Basınca cevap veren mikrofonlardan daha yaygındırlar.

Bazı ölçüm cihazları, kullanıcı tarafından ses yönüne bağlı frekans düzeltmesinin seçilmesine izin vermektedir. Böylece örneğin dağınık alanda bir serbest alan mikrofonuyla, tüm yönlere eşit olarak dağılmış sese dair ölçüm yapmak mümkündür.

Bir ölçüm mikrofonu seçiminde önemli kriterler, dinamik aralık (ses ile tanımlanan alt sınır, belirli bir bozulma seviyesi ile tanımlanan üst sınır) ve frekans aralığıdır. Bu iki

özelliğe ilişkin olarak ideal bir mikrofon yoktur. Bir parametrenin optimizasyonu diğerinin bozulmasına neden olmaktadır.

### 2.9.3. Kalibratörler

Mikrofon kalibratörüne ait görseller Şekil 2.10'da yer almaktadır. Kalibratörler, son derece stabil ve tekrar üretilebilir bir ses basıncı üreten cihazlardır. Kalibratörler, ölçümden önce mikrofonu ve enstrümanı kalibre etmek için kullanılmaktadır. Akustik kalibratör, küçük bir hoparlör yardımıyla referans ses basıncını üretmektedir.

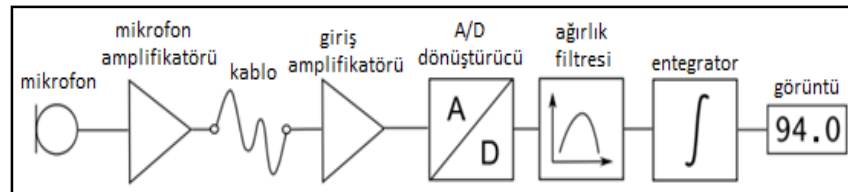


Şekil 2.10. Brüel&Kjær mikrofon kalibratörü (Anonim 2014)

Genellikle 1 kHz'lik bir frekans kullanılmaktadır, ses basıncı seviyesi tipik olarak 94 dB'dir ve muhtemelen +/- 0,3 dB tekrar üretilebilirliği ile 114 dB'dir. A filtresinin 1 kHz'de saydam olması nedeniyle A filtresinin dahil olup olmaması önemli değildir.

### 2.9.4. Ses seviyesi ölçer

Ses seviyesi ölçer, akustik bilim dalında çalışmalar yapan insanların standart ölçüm cihazıdır. Bugünün enstrümanları dijital olarak çalışmaktadır. Ses basıncı ölçer, sesin maksimum ve minimum seviyeleri, eşdeğer enerji seviyeleri ve diğer ses seviyeleri gibi çeşitli sinyal özelliklerinin değerlendirilmesine izin vermektedir. Şekil 2.11'de bir ses seviyesi ölçerin blok diyagramını göstermektedir.



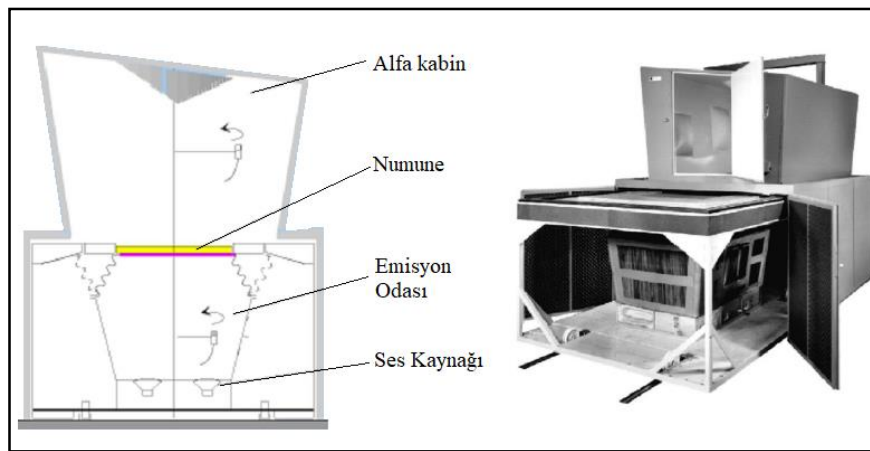
Şekil 2.11. Bir ses seviyesi ölçerin blok şeması (Heutschi 2016)

Bu cihazların dışında akustik ölçümler için gereken yardımcı ekipmanlar bulunmaktadır. Amplifikatör, elektronik sinyalleri arttırmak için kullanılan elektronik cihazlardır. Kablo, bir mikrofon amplifikatörü için kesinlikle gereklidir. Uzun kablolar, yüksek seviyelerde ve yüksek frekanslarda doğrusal olmayan bozulmalara neden olabilir. Giriş amplifikatörü, giriş empedansı çıkış empedansından yüksek olan bir cihazdır.

Entegrator, değişik sinyal özelliklerini toplayarak görüntüleyiciye aktarmaktadır. Frekans analizörleri, bir sinyalin spektral içeriğini araştırmak için kullanılmaktadır. Birçok sinyal işleme alanında FFT analizörleri yaygındır. Diğer yandan akustik uygulamalar için, sıklıkla, frekansa göre sabit olan bir frekans çözünürlüğü tercih edilmektedir (örneğin, oktav ve üçüncü oktav bantları). Özel amaçlar için, daha küçük bant genişlikleri (bir oktavın altıda biri veya on biri) bile mevcuttur.

#### 2.9.5. Alfa kabin ve çınlama odası ölçümleri

Standart boyutlarda oluşturulan akustik kabinlerle yapılan ölçümlerle yüksek frekans bandını da içeren sonuçlar elde edilmektedir. Alfa kabin bütün duvarları birbirine asimetric olarak oluşturulan bir ölçüm kabinidir. İçerisine numune yerleştirildikten sonra oluşturulan sesin sönümlenmesi için geçen süreyi baz alarak içerisinde yer alan serbest alan mikrofonlarıyla ölçüm yapmaktadır. Bu sayede alfa kabin ile ses yutum katsayısı ( $\alpha$ ) ölçülmektedir. Alfa kabin bir diğer kabin sistemi ile aralarında numune yerleştirmek için kalacak bir açıklık vasıtasıyla birleştirildiğinde ses iletim kaybı ölçümüne olanak tanımaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Çınlama odası ve bölümlerinin şematik gösterimi (Aydın 2008)

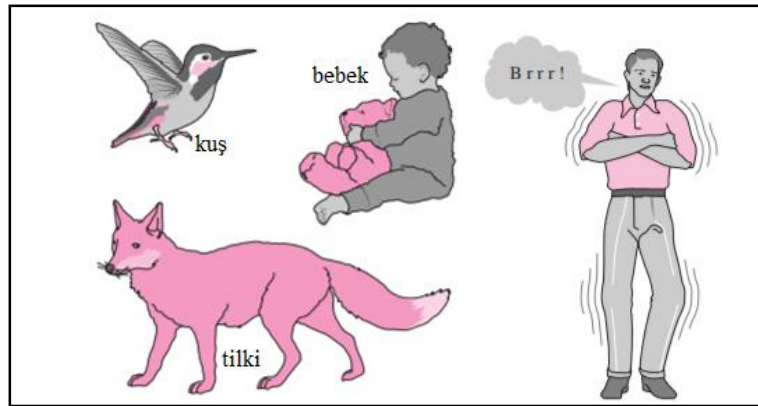
Sonradan birleştirilen kabinde yer alan ses kaynaklarında oluşan ses o kabin içerisinde yer alan mikrofonlar vasıtasıyla ölçülmektedir ve daha sonra numune üzerinden geçerek alfa kabin tarafına geçen ses, alfa kabin içerisinde yer alan mikrofonlar vasıtasıyla tekrar ölçülmektedir. Bu iki ölçüm arasındaki farklı ile ses iletim kaybı ölçülmüş olmaktadır.

### 2.9.6 Empedans tüpleri

Empedans tüpleri yüksek ve düşük frekansın ölçülmesi amacıyla kullanılan sistemin bir parçasıdır. Üzerine yerleştirilen mikrofonlar vasıtasıyla içerisine yerleştirilen küçük boyuttaki numunenin (30mm ve 100mm) ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı değerlerinin ölçülmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan empedans tüpleriyle ilgili detaylı bilgi çalışmanın ilerleyen bölümlerinde aktarılmıştır.

### 2.10. Temel Isı Kavramları

Bir tilki veya kürklerle doğmuş bir ayı gibi hayvanların aksine, insanlar bu zorlu çevre koşullarına karşı çok az koruma ile bu dünyaya gelmektedirler (Şekil 2.13). Bu nedenle termal konfor arayışının, insanlık tarihinin başlangıcına dayandığını iddia edilmektedir (Çengel 2002). Erken yaşta insanların, barınak ve aşırı termal koşullardan korunma sağlayan mağaralarda yaşadığı düşünülmektedir.



Şekil 2.13. İnsanın termal konfor arayışı (Çengel 2002)

Isı transferi hayatın bir parçasıdır. Yaşamın devam etmesi için gerekli bir enerjidir. Isı, belirli sıcaklıktaki bir sistemin sınırlarından, daha düşük sıcaklıktaki bir sisteme, sıcaklık farkı nedeniyle geçen enerjidir. Isı da iş gibi bir enerji transfer biçimidir. Isı sistem



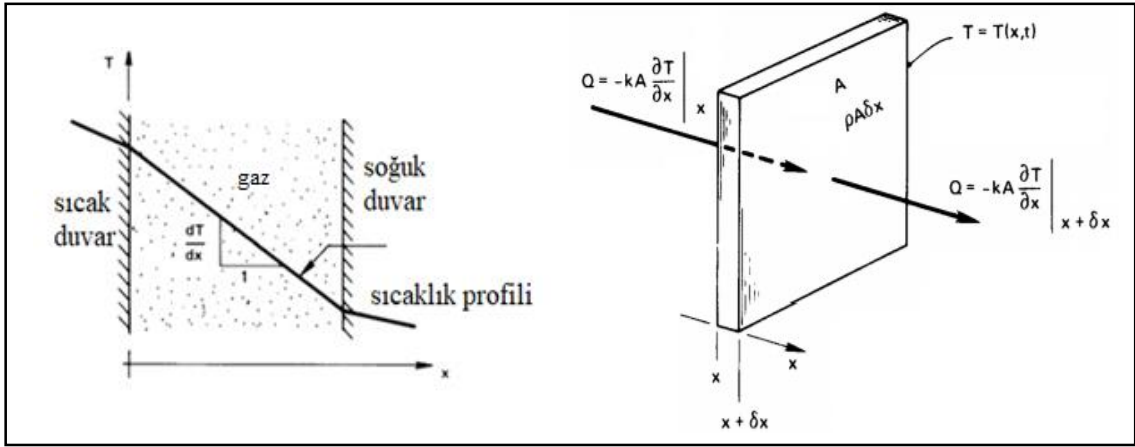
sınırlarında ve geçiş hâlinde iken belirlenebilir. Enerjinin değişik şekilleri olan iş ve ısı ile ilgilenen, özellikle enerjinin dönüşüm kurallarını inceleyen bilim dalı termodinamiktir.

Isı transferi gerçekleştiği durumuna göre farklı modlarda incelenmektedir. Bir katı ya da durgun akışkan ortamında bir sıcaklık farkı bulunuyorsa burada ısı geçişi iletim olarak tanımlanmaktadır. Bir ortamda bulunan yüzeyler ile ortamdaki akışkan arasındaki sıcaklık farkı sebebiyle gerçekleşen ısı geçişi, taşınım olarak tanımlanmaktadır. Ortamlarda bulunan bütün yüzeyler elektromanyetik dalga formunda enerji yaymaktadırlar ve bu sebeple oluşan ısı geçişi ışınım olarak tanımlanmaktadır.

## 2.11. Isı İletimi

Isı transferinin bu modu atomik ya da moleküler seviyedeki aktiviteler ile ilişkilidir. İletim bir maddenin partikülleri arasındaki ilişki esnasında daha fazla enerjiye sahip partiküllerden daha az enerjiye sahip partiküllere enerji transferi olarak görülmektedir (Kılıç ve Yiğit 2000).

Deneysel gözlemlere dayanarak, ısı akışı ve sıcaklık gradyanı arasındaki ilişkiyi veren temel yasa, analitik ısı teorisini kullanan Fransız matematikçi fizikçi Joseph Fourier'in ismi ile adlandırılmaktadır. Homojen, izotropik bir katı (yani, termal iletkenliğin yönden bağımsız olduğu malzeme) için Fourier yasası aşağıdaki Şekil 2.14 ve Denklem 2.87 ile tanımlanmaktadır (Fourier 1822, Özışık 1993).

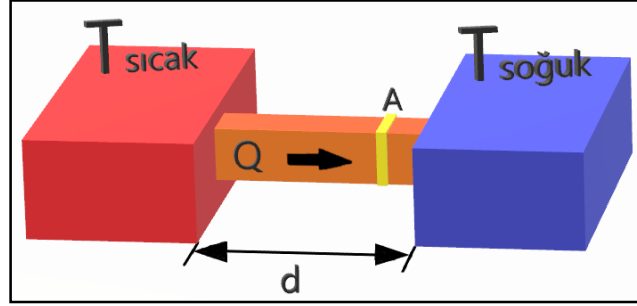


Şekil 2.14. Fourier yasasına göre ısı geçişi (Lienhard 1930)

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.87)$$

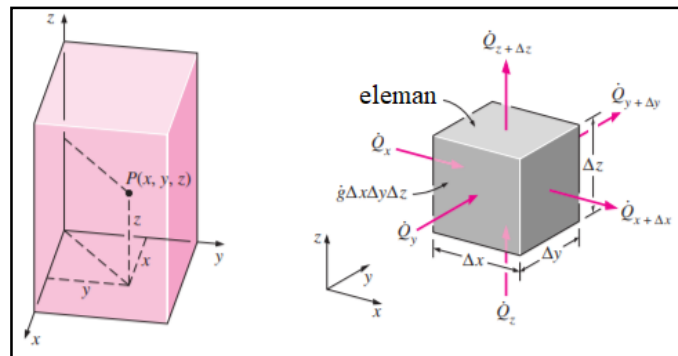
Burada sıcaklık gradyanının izotermal yüzeye normal bir vektör olduğu durumda, ısı akısı vektörü  $Q_x$  ( $w/m^2$ ), birim zamanda izotermal yüzeyin, birim alan başına düşen sıcaklık yönünde ısı akışını temsil eder ve  $k$ , pozitif, skaler bir miktar olan malzemenin ısı iletkenliğidir (Özışık 1993). Ek 1’de birçok malzemenin ısı iletim katsayısı aralığı grafik halinde paylaşılmıştır.

Fiziksel olarak mekanizmayı açıklayabilmek için sıcaklık farkı olan bir kütle düşünülmelidir (Şekil 2.15). Isı iletimi denkleminin temel formu, termodinamiğin birinci yasası (enerjinin korunumu prensibi) uygulanarak elde edilmektedir.



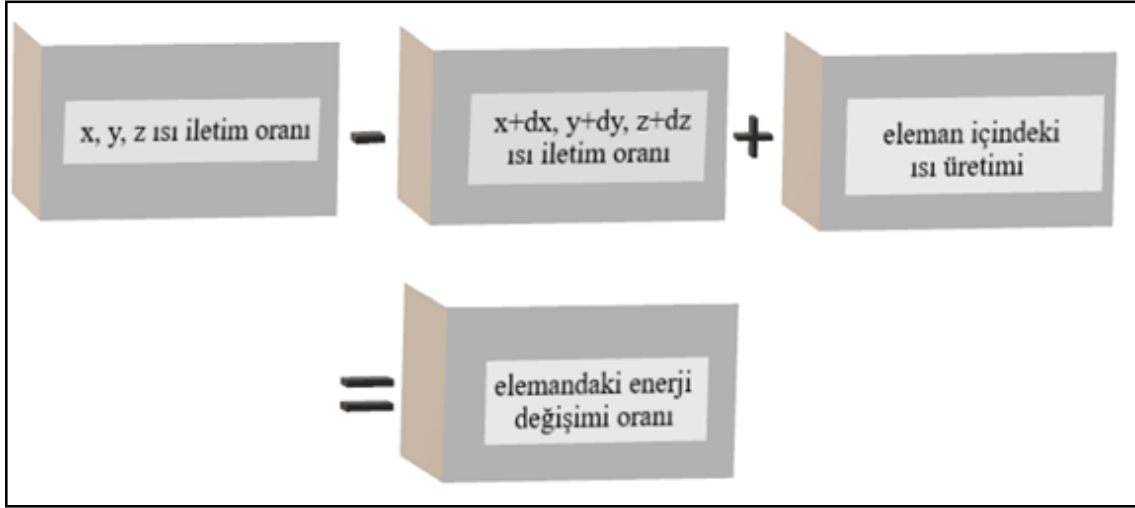
Şekil 2.15. Isı iletimi şematik gösterimi ( $T_{sıcak} > T_{soğuk}$ )

Uygulamada karşılaşılan çoğu ısı transfer problemine tek boyutlu olarak yaklaşılabilir. Ancak her zaman durum böyle değildir ve bazen diğer doğrultulardaki ısı transferinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Bu durumlarda ısı transferi, çok boyutlu ısı transferi olarak adlandırılmaktadır (Çengel 2002). Kartezyen koordinatlarda Şekil 2.16’da görüldüğü gibi bir eleman düşünülecek olursa, enerji dengesi alttaki gibi yazılabilir.



Şekil 2.16. Kartezyen koordinatlarda diferansiyel elemanı (Çengel 2002)

Şekil 2.17’de yer alan denklemdeki ilk terim,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  düzlemlerinde elemana gelen ısı enerjisinin oranını temsil etmektedir. İkinci terim,  $x + dx$ ,  $y + dy$  ve  $z + dz$  düzlemlerinde elementten çıkan ısı enerjisi oranını temsil etmektedir. Üçüncü terim, elementin içindeki ısı oluşum oranını temsil etmektedir.



**Şekil 2.17.** Isı iletimi denklemi şeması

Isı üretim oranı zamana ve ortam içindeki pozisyona göre değişebilir. Pozisyona göre değişim ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) bilindiğinde,  $V$  hacmindeki bir ortamda toplam ısı üretim hızı Denklem 2.88 şeklinde hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}_{\text{üretilen}} = \int \dot{e}_{\text{üretilen}} dV \quad (2.88)$$

Isı üretimi oranı ortam boyunca homojen ise, yukarıdaki Denklem 2.82 aşağıdaki Denklem 2.89 haline gelmektedir.

$$\dot{E}_{\text{üretilen}} = \dot{e}_{\text{üretilen}} \times V \quad (2.89)$$

Genel olarak, bir ortam boyunca ısı iletimi çok boyutludur. Yani, ısı iletimi,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde tekrarlanmaktadır. Bazı durumlarda, belirli bir yönde ısı iletimi, diğer yönlerde oranla çok daha yüksektir. Bu gibi durumlarda, ısı aktarım problemlerinde, o yöndeki ısı iletimini ihmal eden bir yaklaşım yapılmaktadır. Burada kartezyen koordinatlardaki diferansiyel elemanın hacmi  $dV=dx.dy.dz$  olarak elde edilmektedir.

$$(\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx}) + (\dot{q}_y - \dot{q}_{y+dy}) + (\dot{q}_z - \dot{q}_{z+dz}) + \dot{E}_{\text{üretilen}} = \frac{dE}{dt} \quad (2.90)$$

Eleman içerisinde üretilen ısı iletimi oranı dahil edilirse bunun da denkleme dahil edilmesi gerekmektedir.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho dV \cdot c \cdot T) \quad (2.91)$$

$$\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx} = -\frac{\partial}{\partial x}(q_x) \cdot dx \quad (2.92)$$

$$\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -k(dy \cdot dz) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dx \quad (2.93)$$

$$\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot (dy \cdot dz \cdot dx) \quad (2.94)$$

Aynı işlem y ve z eksenleri için de tekrarlanırsa aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

$$\dot{q}_y - \dot{q}_{y+dy} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot (dx \cdot dz \cdot dy) \quad (2.95)$$

$$\dot{q}_z - \dot{q}_{z+dz} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot (dx \cdot dy \cdot dz) \quad (2.96)$$

Kartezyen koordinatlardaki genel ısı iletim denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{\text{üretilen}} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.97)$$

Burada k ısı iletim katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Bu denklem farklı sınır şartlarında farklı haller almaktadır. Kararlı hal, zamanla değişmeyen kararlı bir duruma işaret eder. Sıcaklığın zamandaki değişimi sıfırdır. Bu nedenle kararlı hal için bu denklem alttaki hali almaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{\text{üretilen}} = 0 \quad (2.98)$$

Eğer malzeme homojen ve izotropik ise, malzemenin ısıl iletkenliği sabit olmaktadır.

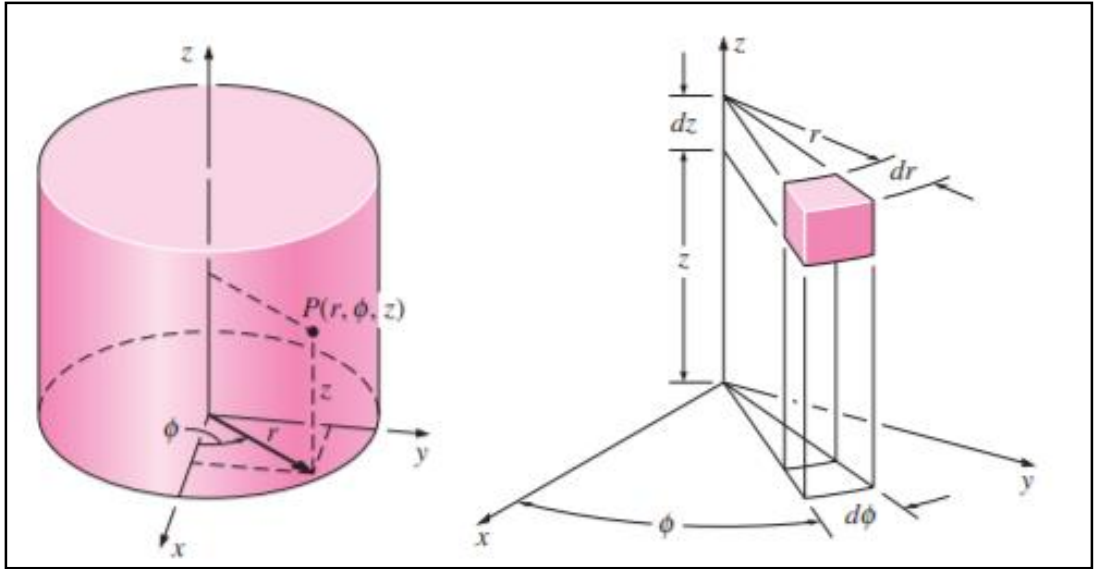
$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\dot{e}_{\text{üretilen}}}{k} = 0 \quad (2.99)$$

$$\nabla^2 T = -\frac{\dot{e}_{\text{üretilen}}}{k} \quad (2.100)$$

Yukarıda elde edilen denklem Poisson eşitliği olarak adlandırılmaktadır. Bu kısımda ısı üretimi oluşmazsa denklem  $\nabla^2 T = 0$  halini almaktadır. Bu eşitlik ise Laplace eşitliği olarak adlandırılmaktadır.

Isı iletiminin ilerleyen bölümlerde anlatılacak olan ölçüm cihazı Alambeta, silindirik bir geometriye sahiptir. Isı iletiminin silindirik ve küresel koordinatlar ile hesaplanmasıyla denklem şekil değişmektedir. Isı iletim eşitliği silindirik koordinatlar kullanıldığında alttaki gibi elde edilmektedir. Şekil 2.18'de silindirik koordinatlarda sonlu bir diferansiyel elemanı üzerinden denklemin nasıl elde edileceği gösterilmiştir.

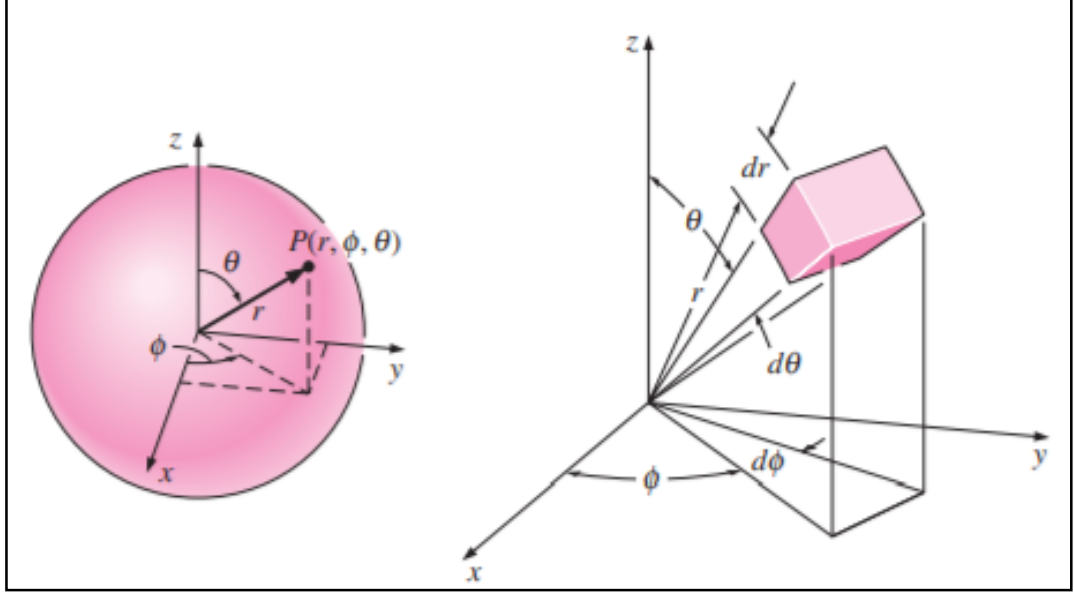
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{\text{üretilen}}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.101)$$



**Şekil 2.18.** Silindirik koordinatlarda diferansiyel elemanı (Çengel 2002)

Isı iletim eşitliği küresel koordinatlar kullanıldığında Denklem 2.102'deki gibi elde edilmektedir. Şekil 2.19'da küresel koordinatlarda yer alan diferansiyel elemanı gösterilmiştir.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{e}_{\text{üretilen}}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.102)$$



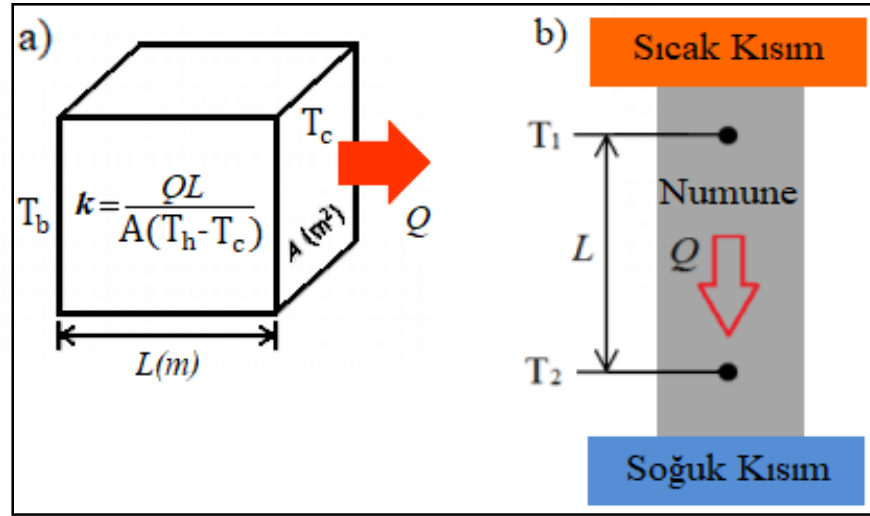
Şekil 2.19. Küresel koordinatlarda diferansiyel elemanı (Çengel 2002)

## 2.12. Isı İletimi Katsayısı Ölçümleri

Isı iletkenliği  $k$ ,  $\kappa$  veya  $\lambda$  olarak şekilleriyle gösterilmektedir. Şekil 2.20.a'da gösterildiği gibi, sabit bir durumda sıcaklık farkı  $T_h - T_c$  altında bir A yüzey alanına, bir uzunluk veya kalınlık olabilen L boyunca iletilen termal enerji (ısı) olarak tanımlanabilir.

Isı iletimi problemlerinin ve sayısal modellemelerinin çözümünde özellikle endüstride, ısıtma-havalandırma ve soğutma tekniğinde pratik hesaplar için çeşitli malzemelerin ısı iletim katsayılarının bilinmesi önem taşımaktadır.

İnşaat ve otomotiv endüstrilerinde sürekli olarak yalıtkan malzemelere dair geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Termal analizlerde ve el hesaplamalarında literatürde verilmiş bir ısı iletim katsayısı değerini direk olarak almak hesabı yanlış sonuçlara götürebilmektedir (Kakaç 1998). Bu bakımdan her yeni malzemenin ısı iletim katsayısı gibi bir fiziksel özelliği belirlenmelidir. Bu sebeple katı cisimlerin ısı iletim katsayısının ölçümünden bahsedilmesi gerekmektedir.



**Şekil 2.20.** Katı ve kalın malzemede Fourier Yasası

Bir malzemenin ısı iletkenliği sıcaklığa ve yöne bağlı olabilir. Ara yüzey termal iletkenliği ( $K$  veya  $G$  olarak ifade edilir), iki bileşenin ara yüzü boyunca ısı akısının sıcaklık düşüşüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Kalın dökme malzemelerin ara yüzey termal iletkenliği, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği, saflığı, eşleşen katıların termal iletkenliği ve temas basıncı gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Saviya ve ark. 2003).

Katı malzemelerin ısı iletkenliklerinin doğru olarak belirlenmesi, malzemenin kullanım yerindeki uygulamada istenilen performansına ulaşması açısından önemlidir. Yıllardır geliştirilen birçok ölçüm tekniği bu performansı sağlamak amacıyla yerine göre kullanılmaktadır. Mevcutta yer alan tekniklerle homojen ve izotropik katı malzemelerin ısı iletkenliklerinin belirlenmesi sağlanmaktadır. Sürekli gelişen ölçüm teknikleriyle mikro ve makro seviyedeki iç yapı karmaşıklıklarının da ölçümlerinin sağlanması istenmektedir. Karmaşık iç yapıdaki kompozit malzemelerin sürekli olarak gelişmesi için yapılan araştırmalar sonucunda değişen iç yapılar ve yeni malzemelerin sürekli olarak keşfedilmesi sebebiyle ölçüm teknikleri de sürekli olarak geliştirilmektedir (Yeşilata ve ark. 2007).

Kararlı hal ölçümünde, termal iletkenlik, sıcaklıktaki değişimle oluşan ısı akışı altında numunenin ölçülmesiyle belirlenmektedir. Çizelge 2.3'te yaygın olarak benimsenen farklı kararlı durum yöntemlerinin şeması gösterilmektedir: kutu yöntemi, paralel plaka

yöntemi, sıcak plaka yöntemi, doğrusal ve radyal ısı akış yöntemi gösterilmiştir. Bunlara ek olarak geçici rejim yöntemleri de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.3.** Termal karakterizasyon için kullanılan bazı ölçüm metotları

	Kalın Malzeme	İnce malzeme
Sürekli Rejim	Kutu yöntemi Paralel plaka yöntemi Sıcak plaka yöntemi Doğrusal ısı akış yöntemi Radyal ısı akış yöntemi	Eletriksel ısıtma yöntemleri
Frekans Düzleminde Geçici Rejim	Darbeli güç tekniği	$3\omega$ yöntemi, FDTR tekniği
Zaman Düzleminde Geçici Rejim	Sıcak tel yöntemi İğne sonda yöntemi Geçici düzlem kaynağı yöntemi	TDTR tekniği

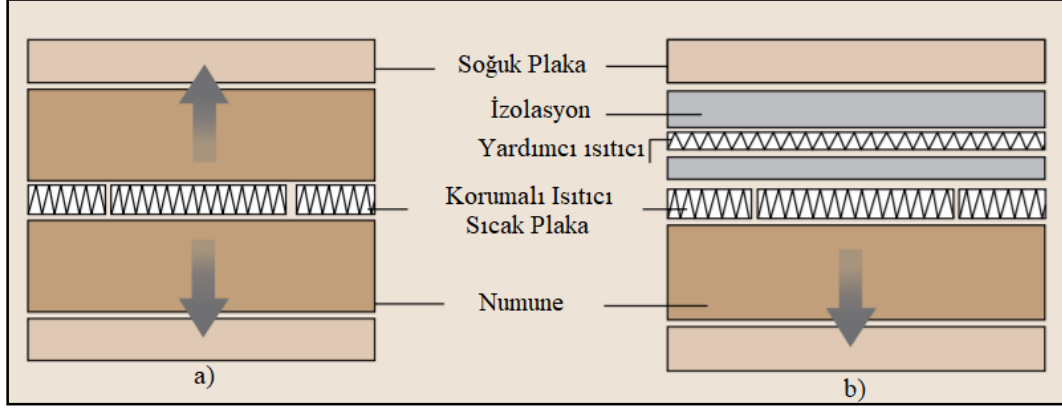
Literatürde birçok ölçüm yöntemi bulunmaktadır ve bunlardan bazıları çizelgede verilmiştir. Bu çizelgede yer alan sürekli ve geçici rejimli ısı iletim katsayısı ölçüm metotları detaylı olarak incelenmelidir.

### 2.12.1. Isı iletim katsayısının ölçülmesinde sürekli rejim yöntemleri

Yalıtkan malzemelerde ısı iletim katsayılarının ölçülmesi için genel olarak sürekli rejim metotları kullanılmaktadır. Sıcak ve soğuk, kutu şeklinde ortamlar arasında yapılan sürekli rejimli ölçümler literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Degiovanni 1994, Ezbakhe 1986, Voumbo ve ark. 2007). Paralel plaka yöntemi, sürekli rejimli bir yöntemdir, tek ve çift numuneli olmak üzere iki çeşidi vardır ve ısı iletimi ölçümlerinde hata payı %2 civarındadır (Buck ve Rudtsch, 2006). Şekil 2.21’de gösterilen sıcak plaka yöntemi, sürekli rejim yöntemlerinden biridir ve ISO 8302 standardında açıklanmıştır (Anonim 1991a). Sıcak plaka yönteminde ısı, korumalı bir ısıtıcıdan, ısıtıcının üzerindeki veya altındaki numuneye doğru aktarılır ve numune diğer tarafta soğuk bir plaka ile sınırlıdır.



Ardından numune sabit duruma ulaştıktan sonra ölçümler yapılmaktadır (Vosteen ve Schellschmidt 2003).



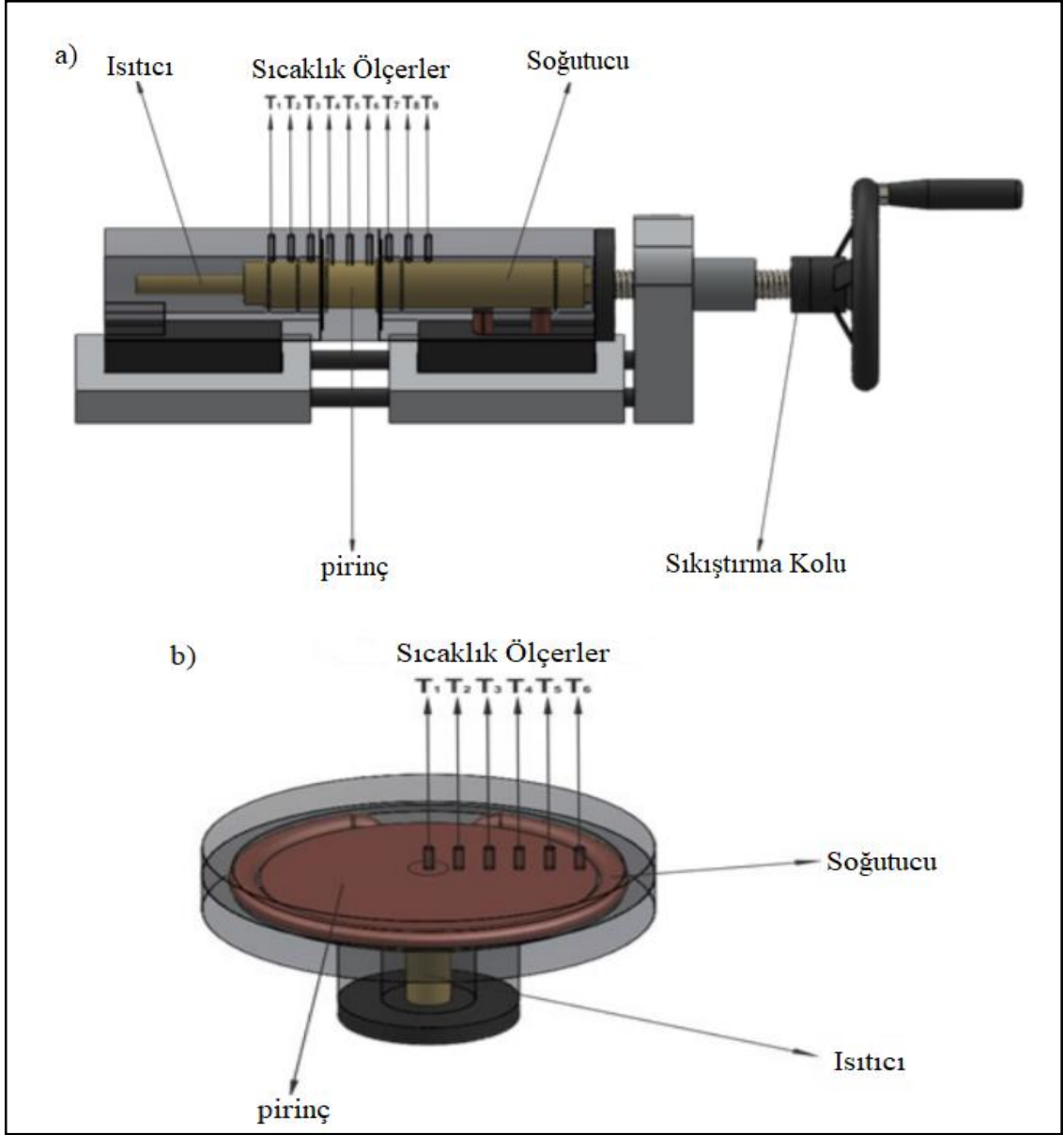
**Şekil 2.21.** Sıcak plaka metodunun şeması a) tek numuneli aparat ve b) çift numuneli aparat (Buck ve Rudtsch 2006)

Doğrusal akış yönteminde ısı iletimi ölçümleri düşük sıcaklıklarda yapıldığından dolayı ısı kayıpları çok fazla değildir ve bu yöntem yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Maglic ve ark. 1984). Doğrusal akış yönteminde hata payı %2'den küçüktür ve yöntemle ilgili detaylı bilgiler ASTM E 1225 ve ASTM C335 standartlarında belirtilmiştir. (Anonim 2013a, Anonim 2017). Doğrusal akış ölçümü Şekil 2.22a'da gösterilmiştir. Bu sistemdeki hesaplamalar Denklem 2.87'de gösterilen Fourier denkleminde ısı iletim katsayısının çekilmesiyle elde edilen Denklem 2.103 ile yapılmaktadır.

$$k = \frac{Q\Delta L}{A\Delta T} \quad (2.103)$$

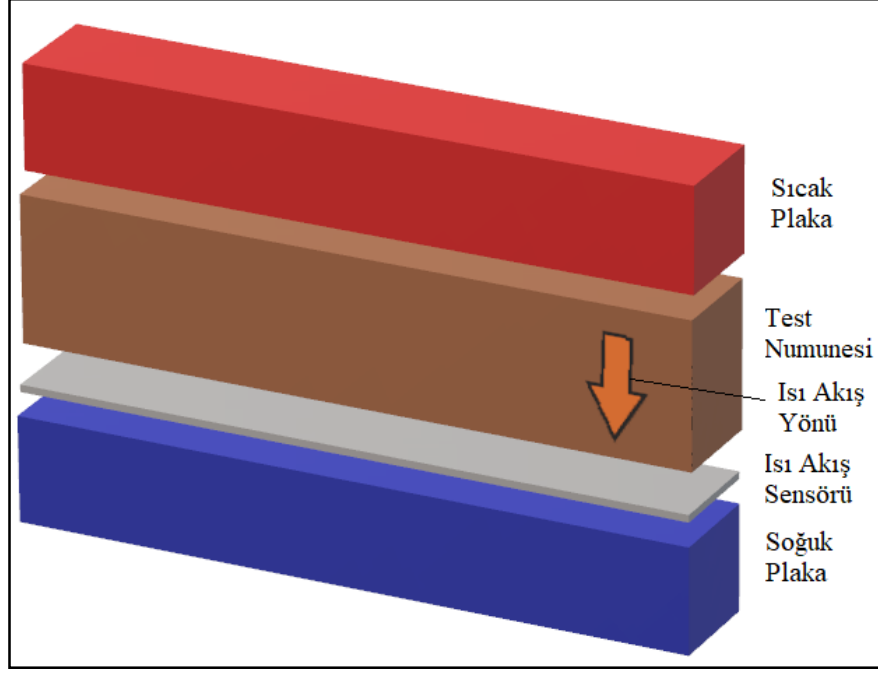
Radyal ısı akış yönteminde, merkezi bir ısıtıcıdan radyal olarak akan ısı, numunenin iç yüzeyinden dış yüzeyine doğru hareket etmektedir. İç ve dış yüzeylerdeki sıcaklıklar termokupl yardımıyla ölçülmektedir. Bu yöntemle düşük ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip numuneler ölçülebilmektedir (Maglic ve ark. 1984). Radyal ısı akış ölçümü Şekil 2.22b'de gösterilmiştir ve ısı iletim katsayısının hesaplanması Denklem 2.104'e göre yapılmaktadır.

$$k = \frac{W \ln \frac{R_b}{R_a}}{2\pi L(T_b - T_a)} \quad (2.104)$$



**Şekil 2.22.** Isı iletim katsayısı ölçümü a) Doğrusal b) Radyal (Anonim 2015a)

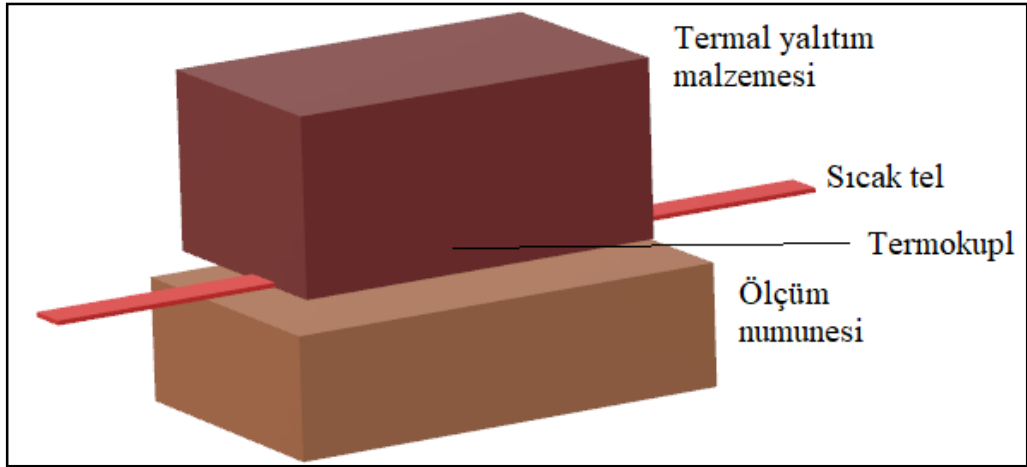
Şekil 2.23’de gösterilen ısı akışı ölçme yönteminde ise sürekli rejimde kararlı hal durumuna gelindiğinde plakalar arasındaki sıcaklık farkları kullanılarak ısı akışibelirlenmektedir ve bu yöntemdeki cihaz tasarımı, tek numuneli sıcak plaka cihazıyla oldukça benzerdir (Mahanta ve Abramson 2010). Isı akışı ölçme yöntemi ASTM E1530 standartına göre yapılmaktadır (Anonim 2019a). Genellikle, bu yöntem 0,01W/mK'den düşük ısı iletim katsayıları için kullanılmaz, aynı zamanda ahşap türünde malzemelerin ısı iletim katsayısı ölçümünde başarıyla kullanılmaktadır. (Yu ve ark. 2011).



Şekil 2.23. Isı akış ölçüm yöntemi

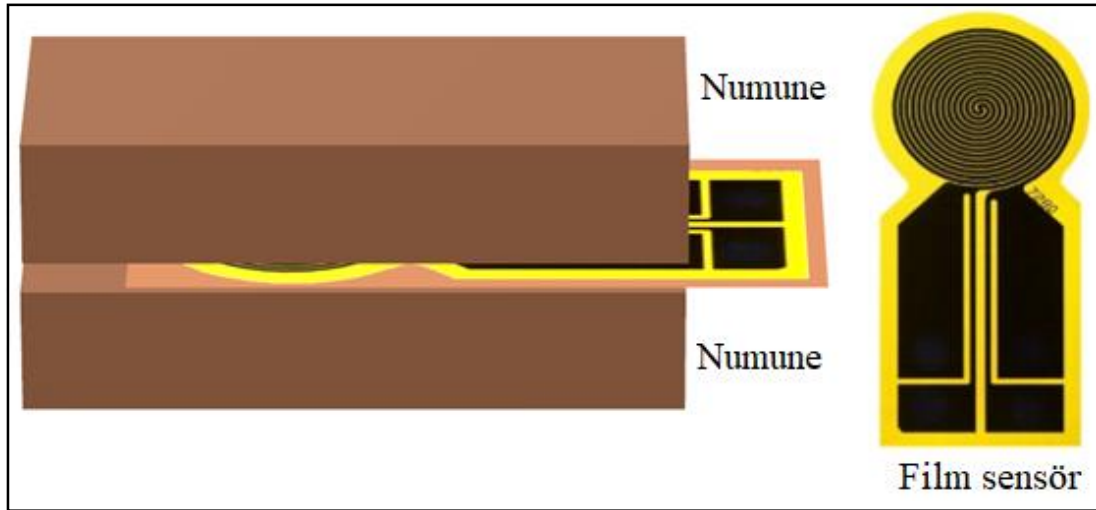
### 2.12.2. Isı iletim katsayısının ölçülmesinde geçici rejim yöntemleri

Modern bilgisayar ve veri analizi sistemlerinin gelişimiyle birlikte, geçici rejimle, ısı iletim katsayılarının ölçülmesi için kullanılan yöntemler ön plana çıkmaya başlamıştır. Sıcak tel yöntemi ve modern geçici sıcak tel deneyinin evrimi, Pittman (1968) ve Mani (1971) tarafından yapılan ilk deneylerden izlenebilmektedir (Şekil 2.24). Bu yöntem, test edilen iki malzeme arasına gömülü lineer bir ısı kaynağının sıcaklık yükselişinin ölçülmesine dayanan geçici rejimli bir tekniktir.



Şekil 2.24. Sıcak tel ölçüm yöntemi

Sıcak tel üzerinde yer alan termokupl sayesinde ısı iletim katsayısı bilinen yalıtım malzemesi ile ölçüm numunesi arasında karşılaştırma yapılarak ölçüm sağlanmaktadır. İğne sonda yöntemi, sıcak tel yöntemine benzer bir yöntemdir ve bir iğne sondası, test numunesinin orta kısmına yerleştirilmekte ve başlangıç sıcaklığı sabit tutulmaktadır. Deney devam ederken, daha önce belirlenmiş miktardaki ısı iğnede üretilmektedir. Bu ısının numunede sıcaklık olarak ilerlemesi, zamanın logaritmasıyla doğrusal olarak gerçekleşmektedir ve bu ilişkiden ısı iletim katsayısı saptanmaktadır. Geçici düzlem kaynağı yönteminde elektronik sensörlerle birleştirilmiş özel bir matematiksel model ve bir düzlem sensör kullanılarak, ısı iletimi ve ısıl taşınım özellikleri Şekil 2.25'te gösterildiği gibi ölçülmektedir. Film şeklinde olan sensör test edilecek numunelerin arasına yerleştirilerek ölçüm sağlanmaktadır. ISO 22007 standardına göre yapılan bu yöntemle ölçülen ısı iletim katsayıları 0,01-500 W/mK aralığını kapsamaktadır. (Anonim 2015b).



**Şekil 2.25.** Geçici düzlem kaynağı yöntemi

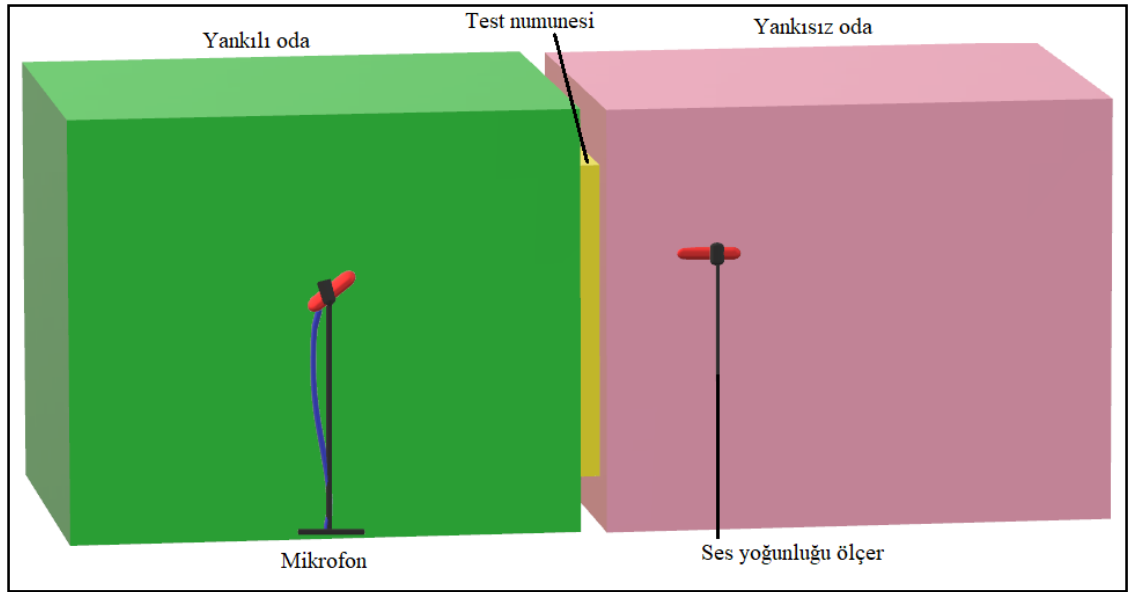
Isı iletim katsayısının belirlenmesine dair birçok yöntem oluşturulmuş ve literatürde paylaşılmıştır. Akustik ve termal özelliklerin belirlenmesini sağlayan ölçümlerle ilgili olarak geliştirme çalışması dahi olsa birçok ölçüm denemesi literatürde yer almaktadır.

Akustik ve termal konfor etkilerinin incelendiği bu çalışma ile ilgili olarak çoğunluğu literatürden alınan bilgiler bu kısımda paylaşılmıştır. İlerleyen bölümlerde çalışmanın metodu ve bulgular aktarılacaktır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sayısal yöntemler çeşitli geometri ve modeller için çözüm üretmektedir. Nümerik yöntemlerle akustik ve termal simülasyonlar gerçekleştirmek için çoğu zaman güçlü bir bilgisayar ve ilgili çözüm yazılımı gerekmektedir. Bununla birlikte bir yaklaşım oluşturmaktadır. Deneysel yöntemler ise üretilmiş sistemler üzerinden, sıcaklık, hız, ses gibi fiziksel değerlerin cihazlar yardımıyla ölçülmesini sağlamaktadır. Burada da ölçüm hataları, kalibrasyon, prototip üretimi gibi sorunların üstesinden gelinmelidir (Yeşilata ve ark. 2007). Bu çalışmada deneysel yöntemler kullanılarak malzemeler üzerinden ilişki kurulmaya çalışılacaktır.

Akustik malzeme testi, malzemelerin akustik özelliklerinin yutum, yansıma, empedans ve aktarma kaybı açısından belirlendiği süreçtir. Malzemelerin akustik özelliklerini belirleyen empedans tüpü, yankılanma odası gibi farklı teknikler bulunmaktadır. Şekil 3.1'de bu ölçüm metotlarından biri olan yankılı ve yankısız oda arasındaki test numunesinin ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Yankılı ve yankısız oda arasında yapılan ölçümler

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan yalıtım malzemeleri hakkında yapılan bilgilendirmenin ardından bu malzemelere ait ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısı değerleri farklı yoğunluklar için Empedans (Kundt) tüpü yöntemiyle elde edilecektir.

Daha sonra Alambeta cihazı ile ısı iletim katsayısı değerleri elde edilecektir. Elde edilen bu değerler arasında bağlantı olup olmadığı araştırılarak ısı ve ses yalıtımı arasındaki ilişki yorumlanacaktır. Bu sayede yalıtım ürünlerine ait 2 farklı fizik disiplini hakkında yapılacak yorumlar doğru malzeme seçiminde kullanılacaktır.

Malzemelerin akustik özelliklerini belirlemek için birçok farklı yöntem kullanılabilir. Bu yöntemler temel olarak malzemenin bilinen ses alanlarında, varlığının ses alanı üzerindeki etkisinin ölçülmesini içerir. Doğruluk ve tekrarlanabilirliğin sağlanması için, iyi tanımlanmış akustik koşullar ve özel enstrümanları öngören malzeme testini kapsayan bir dizi standart bulunmaktadır.

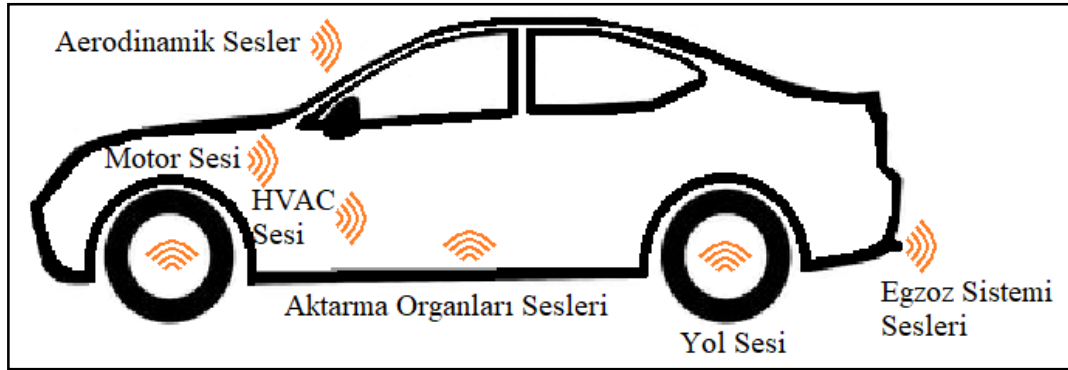
### **3.1. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemeleri**

Otomobillerde yalıtım ürünleri rekabetçi şekilde önem kazanmaktadır. Artan rekabetçi ortamda üretilen ürünlerin maliyet açısından da rekabetçi olabilmesi için özellikle de görünüm özelliği bulunmayan parçalarda akustik hedefler içerisinde kalarak ağırlık ve kalınlık azaltılması gibi maliyet düşürme yöntemleri bulunmaktadır.

Rekabetçi şekilde olduğu için sürekli geliştirilmesi gereken bu yalıtım malzemelerinin akustik ve termal ölçümleri sağlanmalıdır. Yeni geliştirilen malzemelere ait değerlerin literatürde yer alması önem taşımaktadır. Ayrıca yeni geliştirilen malzemelerle kurulacak olan sayısal modellerde sürekli olarak ölçülen değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Termal ve akustik konforun sağlanmasını oluşturan bu yalıtım ürünlerinin araç üzerinde bulunması gereken yerler, başlıca termal ve akustik sınır şartının olduğu kaynak bölgeleridir.

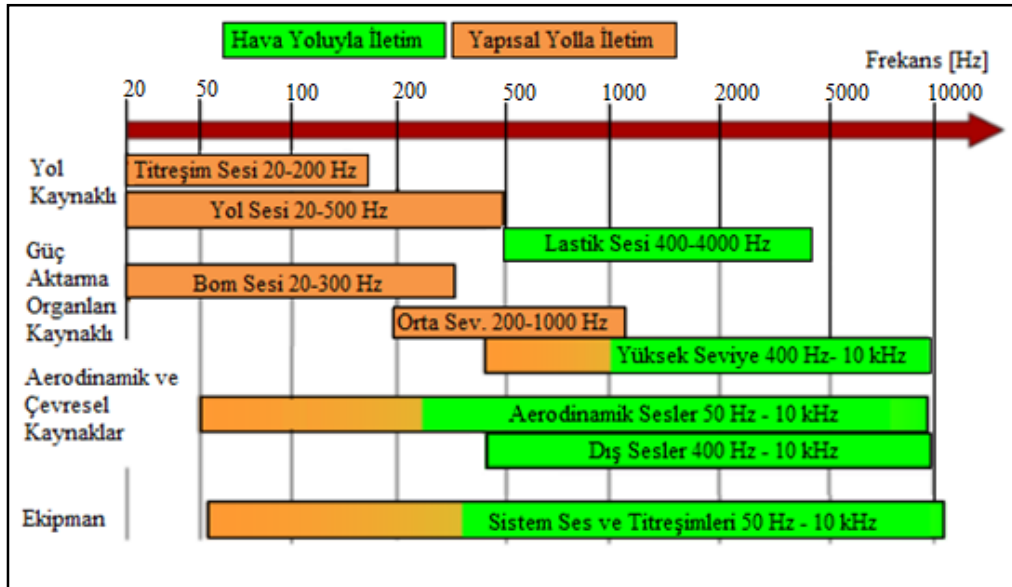
Sürücü ve yolcuları olumsuz şekilde etkileyen ses kaynakları iyi bir şekilde tespit edilmelidir (Şekil3.2). Daha önce bahsedildiği gibi eşdeğer sürekli ses basıncı seviyesi  $L_{eq}$ , verilmiş bir süre içerisinde süreklilik gösteren ses enerjisinin ortalama değerini veren A ağırlıklandırmasında yer alan bir gürültü ölçөгüdür. Bu gürültü ölçөгüne göre karar verilen, ses kaynaklarından gelen sesin, rahatsız edici bir gürültüye dönüşmemesi için bazı ses yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Bunlar motor sesi, aktarma organları sesleri, süspansiyon sistemi sesleri, yol sesi, aerodinamik kaynakların sesleri, HVAC

sisteminin sesleri ve diğer ses ve titreşim kaynakları olarak özetlenebilir (Gelen 2016). Şekil 3.2’de araçlarda bulunan başlıca ses kaynakları gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Araç ses ve titreşim kaynakları

Otomotiv ana sanayinde üretilecek olan araçların ses kaynakları tespit edilmeli ve NVH çözümü bu bölgede sağlanmalıdır. NVH adı İngilizce noise, vibration ve harshness kelimelerinden gelmektedir. Her araçtaki sesin kaynağı bölgesel olarak hemen hemen aynı yerlerde bulunsa da bu kaynakların oluşturduğu seslerin frekansları aynı olmamaktadır. Bu ses kaynaklarına karşılık gelen ortalama frekansların bulunduğu Şekil 3.3, ses kaynaklarında oluşan sesin tespit edilmesine dair bir fikir oluşturmaktadır. Önerilecek NVH çözümlerinde bu frekans aralığına bağlı olarak iyileştirmeler yapılmalıdır.

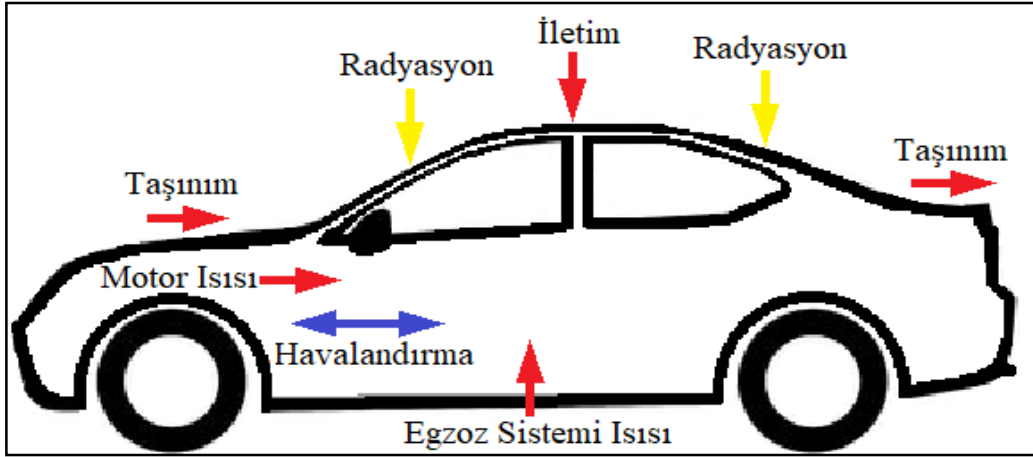


Şekil 3.3. Araç ses ve titreşim frekansları (Gelen 2016)

Burada sesin iletim yolu dikkate alınmalıdır. Ses hava parçacıkları üzerinden veya aracın yapısal kısımları üzerinden titreşim yoluyla iletilmektedir. Bu sebeple iki ayrı şekilde olan ses yayılımına yutum ve iletim olmak üzere ayrı ayrı çözüm üretilmektedir. Tüm bu parametreler aracın titreşim ve ses anlamında konforlu olmasını sağlayan en temel özelliklerdir.

Bununla birlikte otomotiv sektöründe termal yönetim de ayrı bir çalışma konusudur. Dış koşullar motordaki klima yükünün belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Cam özellikleri, kabinin çevresindeki radyasyon ısısı ve hava hızı gibi kabinin termal konforunun çoklu parametreleri, HVAC sisteminin performansını etkilemektedir. Dış çevre ve kabin şartları arasında büyük bir fark olması durumunda, kompresörün, kabini dış ortamdaki izole etmek için daha fazla iş yapması gerekmektedir. Fark küçükse, kompresör daha az iş yapacaktır, bu da klima için motordan daha az güç çekilmesini sağlamaktadır (Shete 2015).

Bu sebeple termal sınır şartının bulunduğu kaynaklar belirlenmeli ve termal yalıtımı sağlayacak olan malzemelerin yerleştirilmesi bu kaynak bölgelerine göre yapılmalıdır. Şekil 3.4'te bu kaynaklar şematik olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Araçta yönetilmesi gereken termal yükler

Otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan malzemelerde daha çok elyaf ve türevleri olan kumaşlar, çok katmanlı kompozit yapılar, mikrofiberler tercih edilmektedir (Zent ve John 2007). Bu malzemelerin yanında ise gövde üzerinden yapısal olarak iletilen ses ve

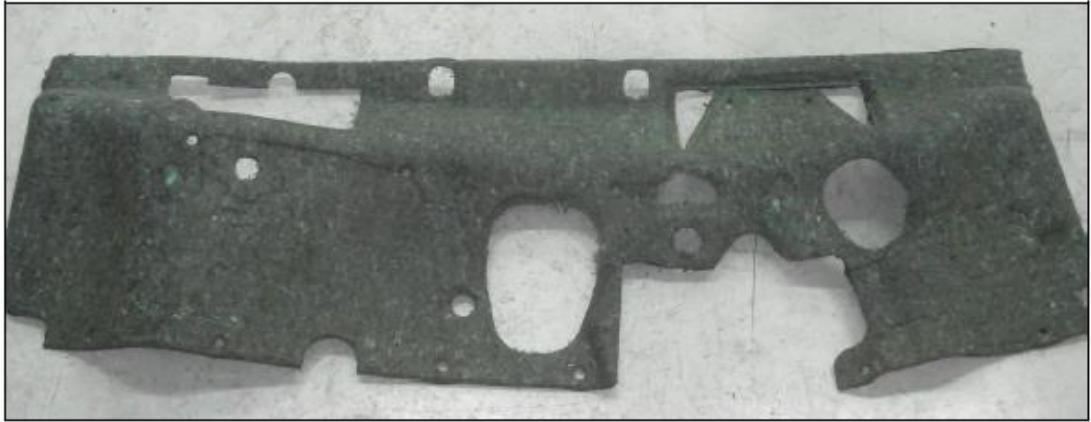


titreşimleri engelleyebilmek için gövde üzerine uygulanan kauçuk, epoksi ve çoğunlukla PVC olan ilave sönüm malzemeleri kullanılmaktadır.

Otomobillerde kullanılan yalıtım malzemeleri amaca göre değişiklik göstermektedir. Motordan gelen ses, yoldan gelen ses, dişli kutusundan gelen ses, motor gaz çıkışından gelen ısı, dış ortam ısı ve gürültüsü gibi konforu etkileyecek olan ve engellenmesi gereken birçok bölge bulunmaktadır.

Motor bölgesi için bu çözümler incelenecek olursa temel amaç motorun belirli hareketlerinde oluşan titreşim kaynaklı sesin engellenmesi üzerinedir. Bu sebeple kaput altı izolatorü, motor enkapsülasyon izolatorü, dış göğüs izolatorü, gibi ürünler yaygın olarak otomobillerde kullanılmaktadır. Bu ürünlerde ağır katman, cam yünü, taş yünü, keçe, poliüretan köpük gibi malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır.

Otomobil gövdesinin içerisinde sesin engellenmesi işini yapan ürünler incelenecek olursa, ön göğüs izolatorü, taban izolatorü, taban paspası gibi temel ürünler öne çıkmaktadır. Ön göğüs izolatoründe geri dönüştürülmüş elyaf keçe veya poliüretan köpük ile ağır katman malzemeleri sesin yutulmasını sağlamak ve iletim yoluyla geçişini önlemek üzere ayrı fonksiyonlarla kullanılmaktadır (Şekil 3.5). Taban kısımlarına ise otomotiv üreticileri görünüm özelliği olan ürünler olduğu için ayrıca dikkat etmektedir. Bu bölgelerde iğne vuruşlu dokumasız polyester halılar veya kauçuk malzemeler kullanılmaktadır. Yine bu taban izolatorü halılarının alt kısımlarında sesin yutulmasını sağlayan poliüretan köpükler tercih edilmektedir.



**Şekil 3.5.** Keçe tipi ön göğüs izolatorü (Aydın 2008)

Otomobil gövdesinin dış kısmında yoldan ve tekerleklerden gelen ses ile aerodinamik etkiler ile oluşan hava kaynaklı sesin engellenmesi üzerine geliştirilmiş ürünler kullanılmaktadır. Bununla birlikte egzoz hattı boyunca oluşan ısının engellenmesi ile ilgili ürünlerde bu bölgeye yerleştirilmektedir. Motor altı kalkanı, tekerlek davlumbazları, gövde altı koruma kalkanı, tünel kalkanı, bagaj tabanı, ısı kalkanı gibi ürünler bu bölgeler için geliştirilmiştir. Burada motor altı kalkanı, tekerlek davlumbazları ve gövde altı koruma kalkanı ürünlerinde genellikle PET köpük malzemesi ve cam elyaf katkılı malzemeler tercih edilmektedir. Isı kalkanı görevini sağlayan ürünler ise alüminyumdan üretilmektedir.

Otomobil tavanında ise ses ve özellikle ısı yönetimi için kullanılan bazı ürünler bulunmaktadır. Tavan uygulamalarında tavanda oluşan ısının kabin içerisini etkilememesi önemlidir. Bu sebeple tavan bölgesinde rijit poliüretan köpük, cam elyaf ve polyester elyaf malzeme uygulamaları bulunmaktadır.

Bunlara ek olarak trim malzemeleri sınıfında sayılabilecek bitüm sönümleyiciler de araçta oluşan titreşimi sönümlemek üzere aracın çeşitli kısımlarına konumlandırılabilir. Otomobilin titreşim ve ses konforunu sağlamak için trim malzemeleri dışında bazı çalışmalar bulunmaktadır ve bunlardan da bahsedilmelidir.

Otomobilin süspansiyon sistemi, gövde ile lastik-yol etkileşimi arasındaki ses iletim yolu üzerinde bulunmaktadır. Bu sebeple bu sistemin dizaynı mutlaka titreşimi azaltacak şekilde yapılmalıdır. Bu kısımlarda iyileştirmeler sağlamak için körük ve burç sistemleri geliştirilmiştir. Ayrıca araç gövdesinin şasiye olan bağlantısı ve araç motorunun şasi ile gövdeye olan bağlantısında da çeşitli takoz sistemleri buralarda oluşacak titreşimi ve titreşim kaynaklı sesleri engellemek üzere kullanılmaktadır. Yapıda bulunan kapı gövde, cam kapı gibi birleşme kısımlarında ise sızdırmazlık elemanları, contalar geliştirilmiştir.

Testler için gereken numuneler farklı içeriklerde, kalınlıklarda ve yoğunluklarda Çizelge 3.1'deki gibi hazırlanmıştır. Kullanılan malzemelerin seçimleri yapılırken malzeme türüne göre içerik değişiminin, yoğunluk ve kalınlık değişiminin oluşturacağı etkinin gözlemlenmesi istenmiştir.

**Çizelge 3.1.** Çalışmada kullanılan numuneler

Malzeme Türü	Numuneler	Şekil 3.6.	Ağırlıklı Alan	Kalınlık
Dokumasız ürünler	% 100 PES – Rip Desen	a	500 $g/m^2$	3 mm
	% 100 PP – Rip Desen	b	500 $g/m^2$	3 mm
	% 100 PES – Dilour Desen	c	900 $g/m^2$	5 mm
	% 70 PES+ % 30 PP – Dilour Desen	d	900 $g/m^2$	5 mm
Mineral Malzemeler	Taş Yünü	e	2400 $g/m^2$	22 mm
	Cam Yünü	f	2200 $g/m^2$	22 mm
Ağır Katman Karışımları	EVA+PVC	g	1700 $kg/m^3$	2 mm
	EVA+PVC	g	1700 $kg/m^3$	3 mm
	EVA+PVC	g	2000 $kg/m^3$	2 mm
	EVA+PVC	g	2000 $kg/m^3$	3 mm
Keçe Tipi Malzemeler	Fenolik Keçe	h	900 $g/m^2$	15 mm
	Epoksi Keçe	i	900 $g/m^2$	15 mm
	PP Keçe	j	900 $g/m^2$	15 mm
	Fenolik Keçe	h	1500 $g/m^2$	25 mm
	Epoksi Keçe	i	1500 $g/m^2$	25 mm
	PP Keçe	j	1500 $g/m^2$	25 mm
Poliüretan Malzemeler	PU	k	75 $kg/m^3$	10 mm
	Rijit PU	l	100 $kg/m^3$	10 mm
	Hafif PU	m	18 $kg/m^3$	10 mm

Bu çizelgede gözükten harflere karşılık olarak alttaki Şekil 3.6’da numunelere ait görseller belirtilmiştir. Burada dokumasız ürünler için Rip ve Dilour ürünün yüzey desenini ifade etmektedir.

Çizelge 3.1’den görüleceği üzere seçilen malzemelerden bazıları hakkında tam olarak kıyaslama yapılacak kalınlık ve yoğunluklar seçilememiştir. Örneğin cam yünü ve taş yünü malzemelerinin seçimin kalınlıklar aynı tutulurken yoğunluk aynı değildir. Malzemelerin sıkıştırılması sonuçları daha çok etkileyeceğinden dolayı malzemeleri üretildiği halde olabildiğince yakın değerlerle seçmek yorum yapmak açısından daha kolay olacaktır. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen ağır katman karışımlarında ve döküm yöntemi ile üretilen poliüretan grubunda böyle bir sorun olmamakla birlikte istenilen değerlerin karşılaştırılması sağlanabilecektir. Fakat elyaflı olarak tabir edilebilecek malzemelerde yoğunluk ve kalınlık değişimi istenen oranlarda sağlanamamıştır. Yine de birbirine yakın değerler seçildiği için cam yünü ile taş yünü arasında veya polipropilen ile polyester elyaflar arasında karşılaştırma yapılabilecektir.



**Şekil 3.6.** Çalışmada kullanılan numunelere ait görseller

Bu çalışma kapsamında dokumasız PES, keçe, PU köpük, ağır katman karışımı, cam yünü, taş yünü malzemeleri incelenecektir. Burada hazırlanan numunelerin çapı akustik testlere göre farklı tüpler için 29 mm ve 100 mm'dir. Isı iletim katsayısı ölçümü için ise 120 mm çapında aynı numuneler hazırlanmıştır. Bu kısımda en dikkat edilmesi gereken numune ağır katman karışımı malzemesinden üretilmiştir. Bu numunede kenarlarda oluşan çapıklar ve hassas olmayan kesimler empedans tüpünde hava kaçaklarına ve tüpe tam olarak yerleşmemeye sebep olmaktadır. Bu sebeple bir su jeti fikstürü hazırlanarak

29 mm ve 100 mm'lik numuneler su jeti ile kesilmiştir. Bu şekilde elde edilen numunelerin kenarları tüpün çerperine daha düzgün yerleşmektedir.

Farklı yoğunluklarda hazırlanan bu malzemeler için akustik ve termal parametreler elde edilecektir. Daha sonra elde edilen bu parametrelerle aynı sınıfta değerlendirilebilecek malzemeler karşılaştırılacaktır.

### 3.2. Ölçüm Cihazları

Bu çalışma boyunca akustik ve termal ölçümlerin yapılmasında kullanılan cihazlar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

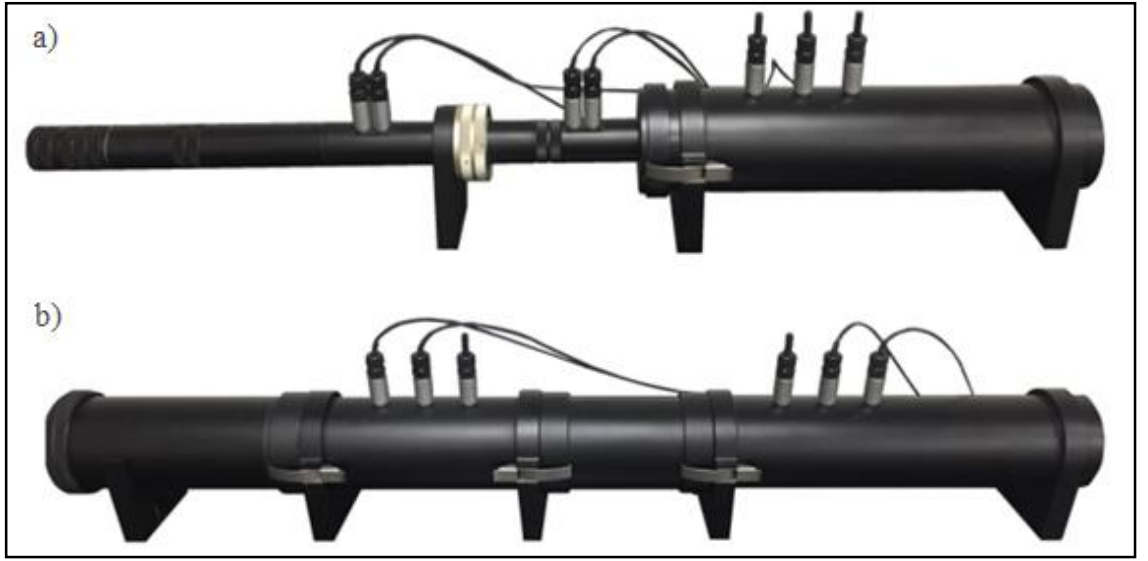
**Çizelge 3.2.** Cihaz listesi

Cihaz Adı	Cihaz Markası	Modeli	Ölçüm Aralığı	Ölçme Hassasiyeti	Ölçülen Boyut
Empedans Tüpü	Brüel&Kjær	4206 Tipi	100 Hz – 6.4 kHz	Mikrofona bağlı	29 mm
Empedans Tüpü	Brüel&Kjær	4206-A Tipi	100 Hz – 6.4 kHz	Mikrofona bağlı	100 mm
Mikrofon	GRAS	46BL-S1 ¼” CCP Pressure	10 Hz – 10 kHz	± 2 dB	-
Kalibratör	Brüel&Kjær	4231 Tipi	1 kHz	94.0 dB ±0.2 dB	Mikrofon
Veri Toplama Sistemi	NI Instruments	USB – 4431	0.8 Hz AC/DC	24 bit 102.4 kS/s	-
Amfi	SMSL	S 36-A PRO	20 Hz – 20 kHz	8Ω SN: 103dB	
Kablo	GRAS	AA0027 BNC	3m	-	-
Alambeta	Sensora	-	0.5-40 mm	±0.5 mW/Mk	120 mm

Ayrıca numune kesim işlemleri için su jeti ve fikstürleri, elektro hidrolik kesme presi, kesilecek numuneye uygun kesme kalıpları kullanılmıştır.

### 3.3. Empedans Tüpü

Empedans tüpü ölçüm yöntemi, testte kullanılan numunelerin kolay üretilmesi, numune boylarının küçük olması ve test sürelerinin kısa olması bakımından oldukça kullanışlı sistemlerdir. Literatürde adı Kundt tüpü olarak da geçmektedir. Kundt'un tüpü, Alman fizikçi August Kundt tarafından bir gaz veya bir katı çubuktaki ses hızının ölçülmesi için icat edilen deneysel bir akustik cihazdır (Kundt 1866). Şekil 3.7'de bu çalışmada kullanılan empedans 29 mm'lik ve 100 mm'lik empedans tüpleri gösterilmektedir.



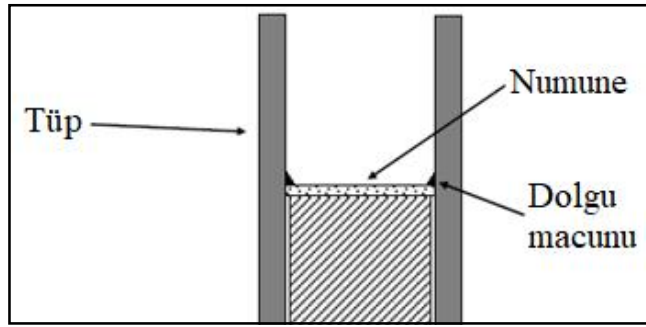
Şekil 3.7. a) 29 mm ve b) 100 mm çaplarındaki empedans tüpleri

Uluslararası bir ölçüm metodu olarak standartlara girmiş bir yöntem olan empedans tüpü ölçümleri transfer metodu olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem sayesinde ses iletim kaybı, ses yutum katsayısı iki farklı tüp ölçümü ve kolay hazırlanan numunelerle hızlıca ölçülmektedir. Test numunesinin yüzeyinde oluşan akustik empedansın etkiyen ve yansıyan ses dalgaları ölçülür ve elde edilen yüzey empedansı değerinin oranısından ses yutum katsayısı değerlerinin hesaplanması prensibine göre çalışmaktadır (Gelen 2016).

ISO 10534-2 standardına göre ses yutum katsayısı, yüksek frekanslar için 29 mm çaplı küçük tüp ile, düşük frekanslar için 100 mm çaplı büyük tüp ile test edilmektedir (Anonim 1998a). Yapılan testler sonrasında düşük frekans ve yüksek frekans ölçümleri yazılım vasıtasıyla birleştirilmektedir. Ölçümlerin çakıştığı ortak frekans bölgesinde

interpolasyon yapıldığından süreksiz bir eğri elde edilmektedir (Kino 2007). Empedans tüpü ile çok düşük frekanslar ölçülememektedir. Bu çalışmadaki test metodunda frekans bandı 100-6400 Hz aralığındadır.

Tüm bunlara ek olarak ağır katman karışımı gibi kenar bölge toleransları düşük olan numunelerin tüpe yerleştirilmesinden bahsedilmelidir. Bu şekilde olan numunelerin tüpe yerleştirilmesi hava kaçakları sebebiyle zorluk yaratmaktadır. Bu sebeple adaptör yapılması, petrolyum jeli kullanılması ve macun kullanılması gibi birçok farklı yöntem denenmiştir. Bu çalışmada en sağlıklı sonuçlar Şekil 3.8’de görüldüğü gibi literatürde de yer alan macun ile elde edilmiştir (Allan ve ark. 2012). Gözenekliliği yüksek olan elyaf türevli ve köpük malzemelerde böyle bir sorun bulunmamaktadır. Çünkü bu tür malzemelerin tüpe değen kısımlarında hava boşluğu bulunmamaktadır.



**Şekil 3.8.** Tüp içerisindeki numuneye dolgu macunu uygulanması (Allan ve ark. 2012)

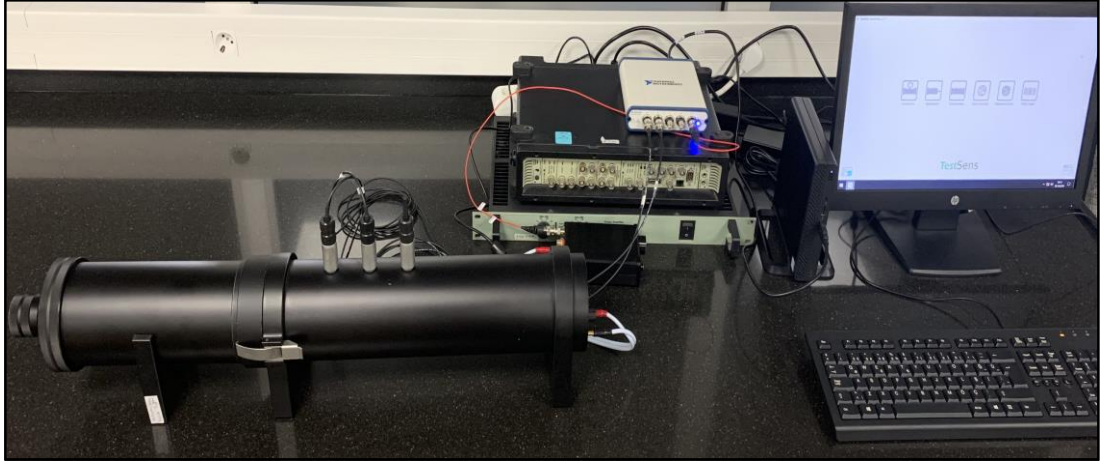
Mikrofonların kalibrasyonları her ölçümden önce Brüel&Kjær’e ait kalibratör ile yapılmıştır. Kalibrasyon sonucu elde edilen karakteristik ölçüm değerleri yazılıma girilerek ölçümler tamamlanmıştır.

#### **3.4. Ses Yutum Katsayısının Empedans Tüpü Yoluyla Elde Edilmesi**

Malzemelerin ses yutum katsayısının belirlenmesi için genellikle kullanılan test metodu ISO 10534-2’ye uyarak ölçümler gerçekleştirilmiştir (Anonim 1998a). Ses emicilerin, ses yutum katsayısının belirlenmesi için bir empedans tüpü, iki mikrofon konumu ve bir dijital frekans analiz sistemi kullanılmaktadır. Bu yöntem akustik yüzey empedansının veya ses emici malzemelerin yüzey kabulünün belirlenmesi için de uygulanabilir. Ses emici bir malzemenin empedans oranları, hava akış direnci, gözeneklilik, elastikiyet ve

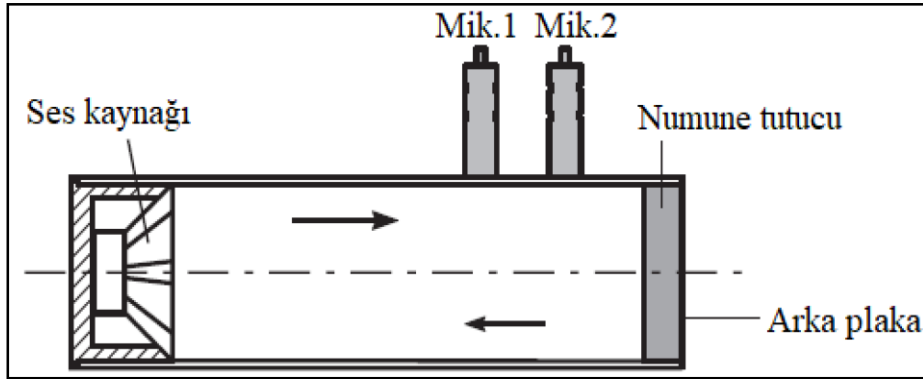
yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ile ilgili olduğundan, bu test yönteminde açıklanan ölçümler, temel araştırma ve ürün geliştirmede yararlıdır.

Şekilde 3.9’da görüldüğü gibi test düzeneği 1 adet Brüel&Kjær tüp donanımı, 2 adet ¼” Gras mikrofona, 1 adet amfi, 1 adet NI veri toplama sistemi ve 1 adet toplanan verileri hesaplayarak grafik haline getiren TestSens yazılımından oluşmaktadır. Şekil 3.7’de görülen tüp 100 mm çapındadır. 29 mm çapında olan tüplü ölçümler de aynı düzenek ile yapılmaktadır.



**Şekil 3.9.** Yutum halindeki empedans tüpü test düzeneği

Bu test yönteminde, düzlem dalgalar, bir tüpte, bir gürültü kaynağı tarafından üretilmektedir. Tüpün çeperine monte edilmiş mikrofonlar iki sabit konumda akustik basınçların ölçülmesini sağlamaktadır. Daha sonra karmaşık akustik transfer fonksiyonunun hesaplanması cihaza ait yazılım tarafından sağlanmaktadır (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10.** Ses yutum katsayısı ölçümünün şematik gösterimi (Anonim 2019d)



Test numunesi düz, sert, pürüzsüz ve hava geçirmez bir empedans tüpünün bir ucuna monte edilmektedir. Düzlem dalgalar tüpte bir ses kaynağı tarafından rastgele olacak şekilde üretilmektedir ve ses basınçları numuneye yakın iki konumda tüpün çerperine yerleştirilmiş mikrofonlar ile ölçülmektedir. İki mikrofon sinyalinin karmaşık akustik transfer fonksiyonu, yutum katsayısını ve test malzemesinin empedans oranını hesaplamak için kullanılmaktadır.

Miktarlar, örnekleme frekansından ve ölçümler için kullanılan dijital frekans analiz sisteminin kayıt uzunluğundan belirlenen bir frekans çözünürlüğüne sahip frekansın işlevleri olarak belirlenmektedir. Kullanılabilir frekans aralığı, borunun genişliğine ve mikrofon konumlarının arasındaki boşluğa bağlıdır.

Şekil 3.9’da gösterilen düzenek, bu çalışmaların tamamında 24 saniyelik ölçüm süresine, rastgele ses dalgalarına ve 6 dB’lik amfi ses seviyesine ayarlanarak ölçümler yapılmıştır. Bu konfigürasyondaki empedans tüpü sayesinde tek boyutlu akustik tahrik altında 100-6400 Hz frekans bandında ses yutum katsayıları elde edilmiştir.

### **3.5. Ses İletim Kaybının Empedans Tüpü Yoluyla Elde Edilmesi**

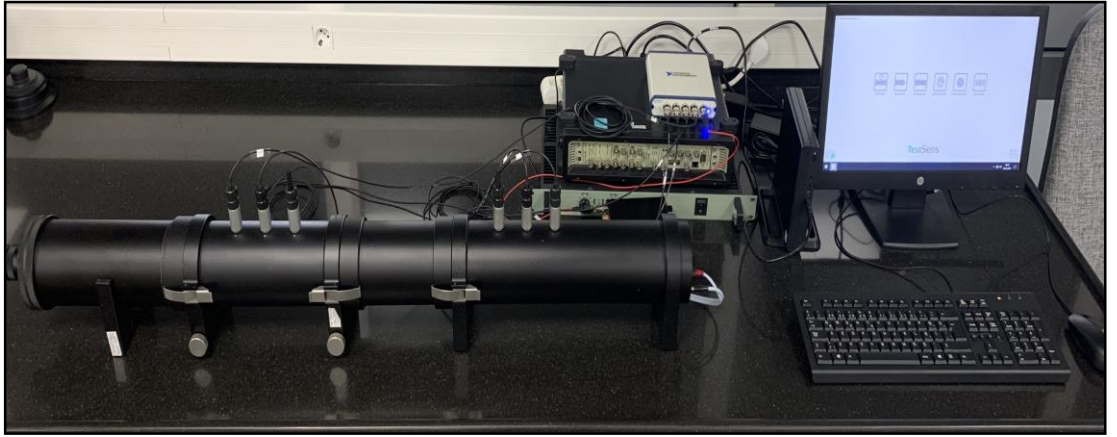
Burada malzemelerin ses iletim kaybının belirlenmesi için genellikle kullanılan test metodu ASTM E2611–19’ye uyarak ölçümler gerçekleştirilmiştir (Anonim 2019b). Bir malzemenin iletim kaybının ölçümü, gürültünün bariyer kullanılarak engellenmesi gibi konularda ilgi çekicidir. Örneğin, araç torpidosunun motor ve araç kabini bölmeleri arasında bir bariyer görevi görmesi gibi durumlarda önem kazanmaktadır.

Bu yöntem ile daha geleneksel olan yankısız oda yönteminin arasında önemli farklılıklar vardır. Özel olarak, bu yaklaşımda ses, geleneksel yöntemlerin rastlantısal gelişi ile karşılaştırıldığında, numuneye dik yönde etki etmektedir. Ek olarak, yankılanma odası yöntemleri, tüm malzemeler için pratik olmayabilir test örnekleri için belirli minimum boyutları belirtir. Şu anda, eğer varsa, iki yöntem arasındaki korelasyon bilinmemektedir. Ön göğüs gibi kompleks sistemlerin akustik performansının ölçülmesinde bu gibi kaynak ve alıcı oda sistemleri kullanılmaktadır. Fakat prototip hazırlanmadan önce daha küçük numunelerle daha hızlı sonuçlar alınması adına empedans tüpünün bu ölçüm metodu

tercih edilmektedir. Tek yönlü bir ses kaynağı ve alıcı tüpler arasında yapılan ölçümle iletim yoluyla ilerleyen sesteki kayıp bulunmaktadır.

İletim kaybı, yalnızca bir malzemenin özelliği değildir, aynı zamanda, yönteme ve malzemenin montaj şeklinin detaylarına dahil olan sınır koşullarına da büyük ölçüde bağlıdır. Bu durum, bu test yöntemiyle elde edilen sonuçların yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. Rijit malzemelerin ölçümlerinde titreşim sebebiyle doğal frekansların aktif olması gibi sınır şartlarının etkileri gözlemlenebilmektedir. İşte bu sebeple rijit malzemelerin tüpe yerleştirilmesinde petrolyum jeli, macun kullanımı önerilmektedir (Anonim 2019d).

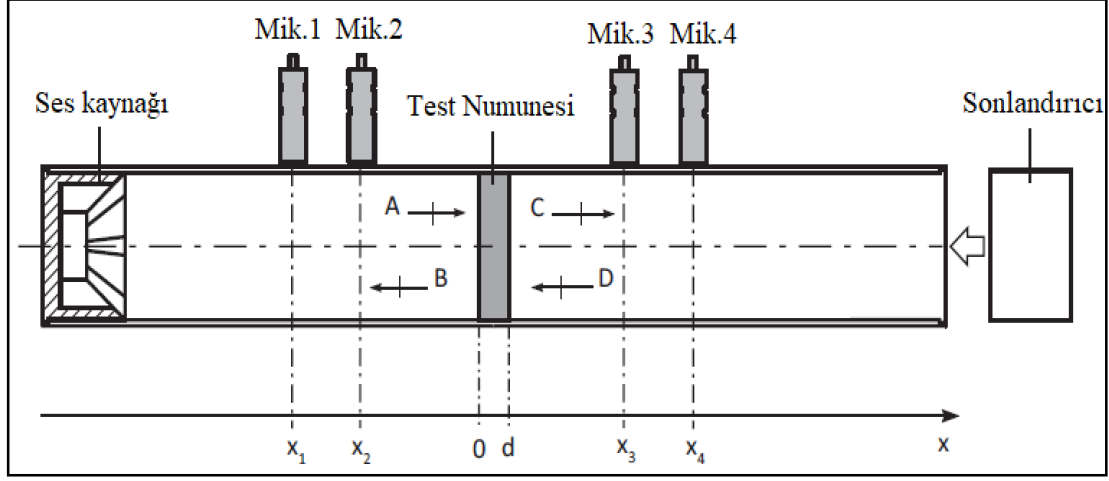
Şekil 3.11’de görüldüğü gibi test düzeneği 1 adet Brüel&Kjær tüp donanımı, 4 adet ¼” Gras mikrofona, 1 adet amfi, 1 adet NI veri toplama sistemi ve 1 adet toplanan verileri hesaplayarak grafik haline getiren TestSens yazılımından oluşmaktadır.



**Şekil 3.11.** İletim halindeyken empedans tüpü test düzeneği

Empedans tüpünün bir ucuna bir ses kaynağı (hoparlör) monte edilir ve malzemenin bir numunesi tutucuya yerleştirilir. Hoparlör, düzlem dalgaları olarak yayılan geniş bantlı, rasgele ses dalgaları üretmektedir. Düzlem dalgaların ilerleyişi sırasında numunede dalgaların bir kısmı tutulmaktadır. Ses kaynağının olduğu tüpe doğru geri yansıyan, malzeme tarafından emilen ve malzeme içinden alıcı tüpe geçen kısımlar olarak bu dalgalar ayrışmaktadır. Malzemedeki geçen düzlem dalgalarının bir kısmı, dalgaların bir kısmının yansıdığı ve bir kısmının da tüpten çıktığı alıcı tüpün ucuyla karşılaşmaktadır. Bu sebeple iki farklı sonlandırıcı yöntemiyle ölçüm gerçekleştirilmektedir. Öncelikle

anekoik sonlandırıcıli yöntemle ölçüm alınır ve daha sonra yansıyan sonlandırıcıli yöntemle ölçüm alınır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Ses iletim kaybı ölçümünün şematik gösterimi (Anonim 2019d)

Bu ölçümler yazılım ile birleştirilmektedir. Dört sabit konumdaki (kaynak tüpünde iki, alıcı tüpte iki) ses basıncı ölçülerek ve dört kanallı bir dijital frekans analizörü kullanılarak karmaşık transfer fonksiyonu hesaplanmaktadır. Malzemenin iletim kaybını belirlemek mümkündür. Kullanılabilir frekans aralığı, tüpün çapına ve mikrofona konumları arasındaki boşluğa bağlıdır (Anonim 2019d).

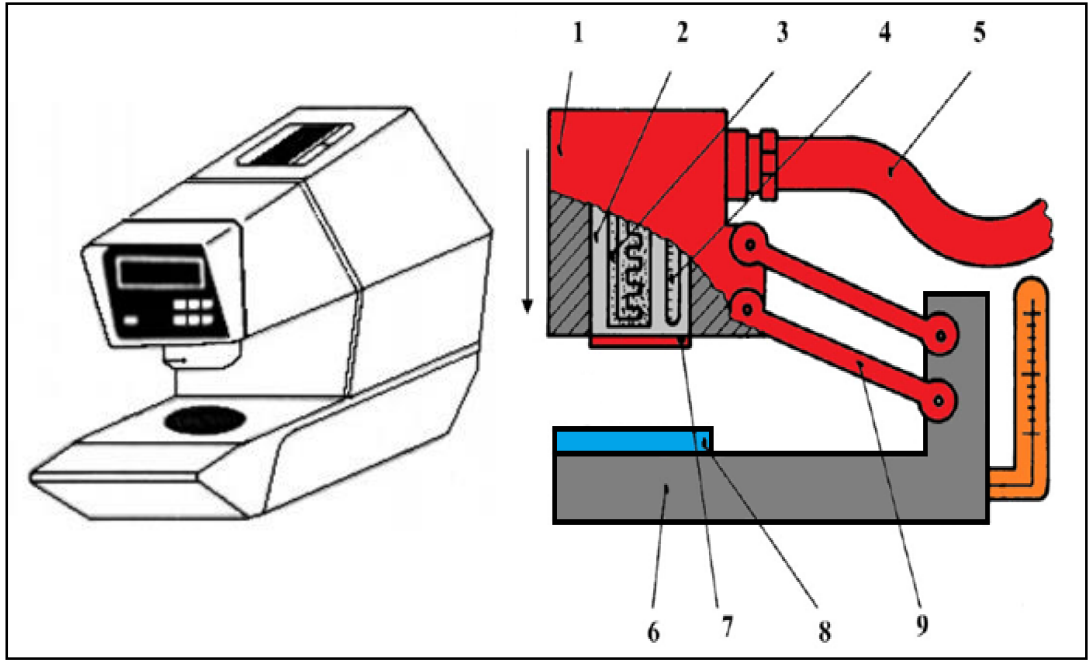
Şekil 3.11’de gösterilen düzenele, bu çalışmaların tamamında 24 saniyelik ölçüm süresine, rastgele ses dalgalarına ve 6 dB’lik amfi ses seviyesine ayarlanarak ölçümler yapılmıştır.

### 3.6. Isı İletim Katsayısının Alambeta Cihazıyla Elde Edilmesi

Bilinen bir güç miktarındaki ısı kaynağı, ısısını her yöne yaymaktadır. Kararlı durumdaki ısı yalıtım özelliklerini (özellikle ısı direnç ve ısı iletkenlik) değerlendirmek için en yaygın olarak kullanılan toğmeter (Anonim 1971) ve ASTM D 1518-85 standardına göre sıcak plaka (Anonim 1990a) testleri bulunmaktadır. Fakat bu yöntemler test için gereken süre, örneklerin boyutu gibi çeşitli dezavantajlara sahiptir. Günümüzde, kumaşların geçici hal özellikleri önemli hale gelmiştir. Çek Cumhuriyeti, Liberec Teknik Üniversitesi’nde geliştirilen Alambeta enstrümanı (Anonim 1990b) bu özellikleri belirleyebilmektedir.

Bu çalışmada test numunelerinin ısı direnci, ısı iletkenliği Alambeta (Sensora, Çek Cumhuriyeti) üzerinde değerlendirilmiştir. Test için Bursa Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Alambeta cihazı kullanılmıştır.

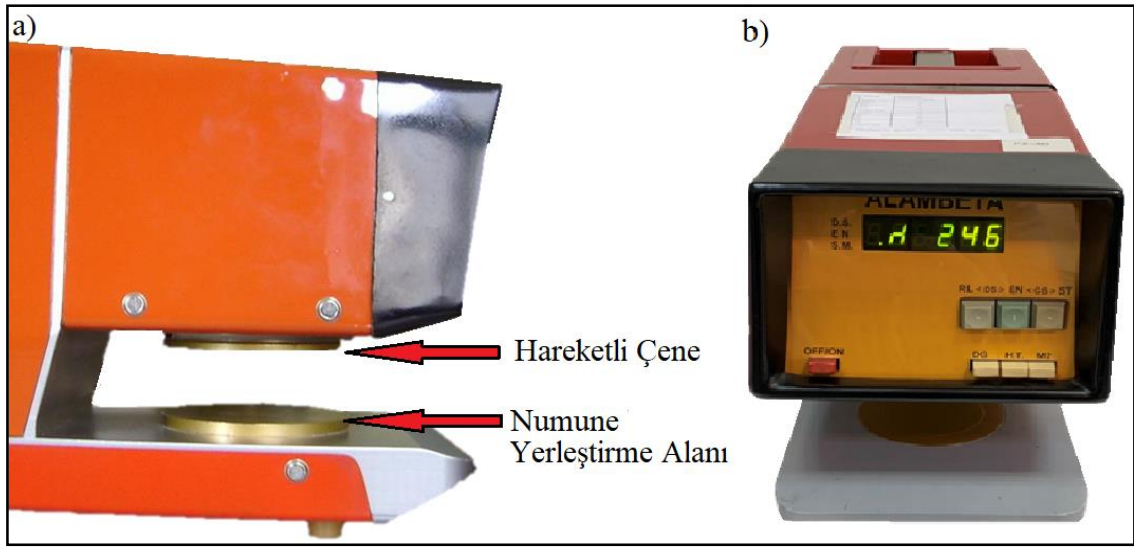
Alet, arasına numunenin yerleştirildiği sıcak ve soğuk bir plakadan oluşmaktadır. Sıcak plaka kumaşa 200 Pa basınçta temas etmektedir. Sıcak plaka sıcaklığı önceden ayarlanmış değere ulaştığında, ısı akış sensörü, sıcak plakadan soğuk plakaya olan ısı akışını algılamaktadır. Isı akış değeri ve kalınlığı, kumaş iletkenliğini ve son olarak ısı direnci hesaplamak için kullanılmaktadır. Cihaz Şekil 3.13'te şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 3.13'te yer alan numaralara göre cihaz incelemek olursa, 1: ölçüm kafası, 2: bakır blok, 3: ısıtıcı, 4: sıcaklık sensörü, 5: bilgisayar bağlantısı, 6: metal plaka, 7: ısı akış sensörü, 8: test numunesi, 9: hareket mekanizması olarak tanımlanmaktadır.



**Şekil 3.13.** Alambeta cihazının şematik gösterimi (Hes ve Ivan 1989)

Alambeta cihazında yapılan ölçümlerde düşük ve yüksek sıcaklık olmak üzere iki farklı ölçüm sıcaklığı seçeneği bulunmaktadır. Bu çalışmada düşük sıcaklık ile ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm metodunda üst ölçüm plakası 32°C ve alt ölçüm plakası 22°C sıcaklığındadır. Mikron seviyesindeki çok ince veya 40 mm seviyesinde kalın olan malzemeler ile ölçüm yapılamamaktadır.

Cihaz çalıştırıldıktan sonra homojen ısının sağlanması için bir süre beklenmelidir. Daha sonra Alambeta cihazı doğrulama parçası, cihaza yerleştirilir. Cihaz çalıştırılınca ölçüm kafası aşağıya inerek parçanın üst yüzeyine temas eder. Daha sonra ölçüm bitince ölçüm kafası yukarı kalkarak ilk pozisyonunu alır. Cihaz üzerinde okunan ısı iletim katsayısı değeri 34 mW/mK aralığında ise doğrulama yapılmış olur. Daha sonra test numuneleri cihaz üzerine yerleştirilir ve aynı çevrim tekrarlanarak ölçümler tamamlanır. Cihazın ısısı konusunda sorun yaşanmaması için ölçümler arasında minimum 5 dk beklenmelidir. Cihaza ait görsel Şekil 3.14’te yer almaktadır.



**Şekil 3.14.** BUÜ Tekstil Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Alambeta cihazının a) yandan b) önden görünüşü

Cihaz ısı iletim katsayısı, ısıl emicilik, ısıl direnç, numune kalınlığı, ısı akış yoğunluğu gibi değerleri ölçmektedir. Bu çalışmada sadece ısı iletim katsayısı değerleri kaydedilmiştir. Her test malzemesi için 120 mm çapında 5'er adet numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler belirli süre aralıklarla arka arkaya ölçülmüştür. Her malzeme için oluşturulan 5 numune ile 5 ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerin ortalaması alınarak sonuçlar kısmında bu ortalama değer paylaşılmıştır.

Bir malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) ne kadar küçükse, yalıtımı o kadar iyi demektir. Ancak bu değer tek başına bir şey ifade etmez. Isı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) ile malzemenin kalınlığı beraber değerlendirildiğinde o malzemenin yalıtım özelliği ile ilgili bir sonuca ulaşabilmektedir.

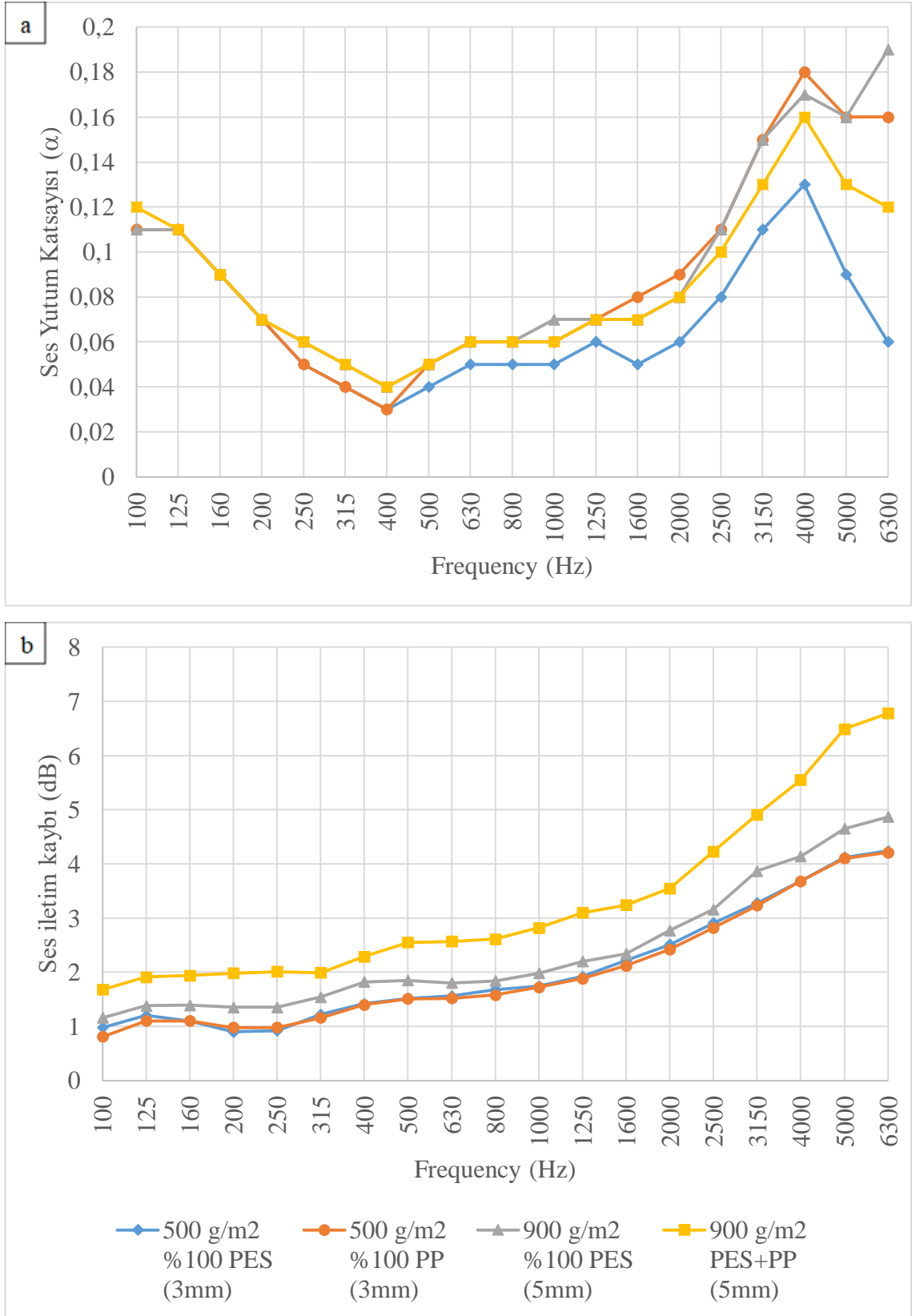
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde daha önce tanıtılan iç trim malzemelerinin ses yutum katsayısı, ses iletim kaybı ve ısı iletim katsayısı değerleri paylaşılacaktır. Sağlıklı bir karşılaştırma yapılması açısından trim malzemeleri bazı gruplara ayrılmıştır. Dokumasız ürünler, viskoelastik ağır katman karışımı, poliüretan, mineral ve keçe grupları kendi içlerinde karşılaştırılacaktır. Kalınlık ve ağırlıklı alan parametrelerinin değişimi ile oluşan farklılıklar paylaşılacaktır. Ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı için paylaşılan sonuçlar 1/3 oktav bandındadır.

### 4.1. Dokumasız İğnelenmiş Ürünlere Ait Ölçüm Sonuçları

Öncelikle dokumasız iğnelenmiş ürünlere ait empedans tüpü deneyi sonuçları paylaşılmıştır ve Şekil 4.1’de görülmektedir. Dokumasız ürünlerle karşılaştırma yapılabilmesi adına aynı ağırlıklı alan, kalınlık ve desende inceleme yapılmıştır. Burada kullanılan dokumasız ürünler, PP ve PES elyaflarının iğne vuruşlu yöntemle işlenmesi ve arka yüzeylerine apre uygulanmasıyla elde edilmiştir. İki farklı ağırlıklı alan için paylaşılan sonuçlardan öncelikle düşük ağırlıklı alana sahip olan ürünler incelenecek olursa burada polipropilen ve polyester kullanılması halinde akustik değerlerdeki farklılıklar gözlemlenmeye çalışılmıştır. %100 Polipropilen kullanılması durumunda ses yutum katsayısının iyileştiği gözlemlenmiştir, ses iletim kaybında ise belirgin bir değişiklik oluşmamaktadır.

Ses iletim kaybı daha çok ortam koşullarına ve sınır şartlarına bağlıdır. Ağırlıklı alanı daha yüksek olan kumaşlarda ise tamamı polyesterden oluşan ve polipropilen katkılı polyesterden oluşan iki tür kumaş karşılaştırılmıştır. Bu ağırlıklı alanda polipropilen katkılı polyester kumaşın ses iletim kaybı açısından açıkça daha iyi olduğu gözükmemektedir, ses yutum katsayısında ise sadece yüksek frekanslarda bir ayırım gözlenmiştir. Genellikle otomotiv taban halılarında kullanılan bu kumaşların bir yüzeyi aprelidir. Bu sebeple iki farklı yüzeyden ses dalgası gönderilerek denemeler yapılmıştır. Mantıklı sonuçlar aprenin uygulanmadığı yüzeyden alındığı için bu sonuçlar paylaşılmıştır. Rip ve Dilour dokumasız ürünlerin yüzeyinde oluşturulan desenin ismidir. Yüzey üzerinde oluşturulan desen, yüzeyin akustik empedansını etkileyebileceği için aynı desende yüzeyler tercih edilmiştir.



**Şekil 4.1.** Dokumasız iğnelenmiş ürünlerin a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Dokumasız ürünlere ait ses yutum kaybı grafiklerinde 4000-6300 Hz yüksek frekans bölgesinde düşüş gözükmemektedir. Bunun sebebinin yapılan çokça testten sonra malzeme kalınlığının düşük olması ile alakalı olduğu anlaşılmıştır. Frekans bandınının 200 Hz altı olan bölümünde alınan sonuçlar kesinlik ifade etmemektedir. Çünkü bu frekanslar empedans tüpü ölçüm metodu için çok uygun değildir. İnce kalınlıklı malzemelerde genel olarak yüksek frekans bölgesinde bu düşüşler olmaktadır. Ürünlerin eğri davranışları ile ilgili daha kesin ifadeler kullanılması için ürünlere ait Biot parametrelerinin tamamının ölçülmesi gereklidir.

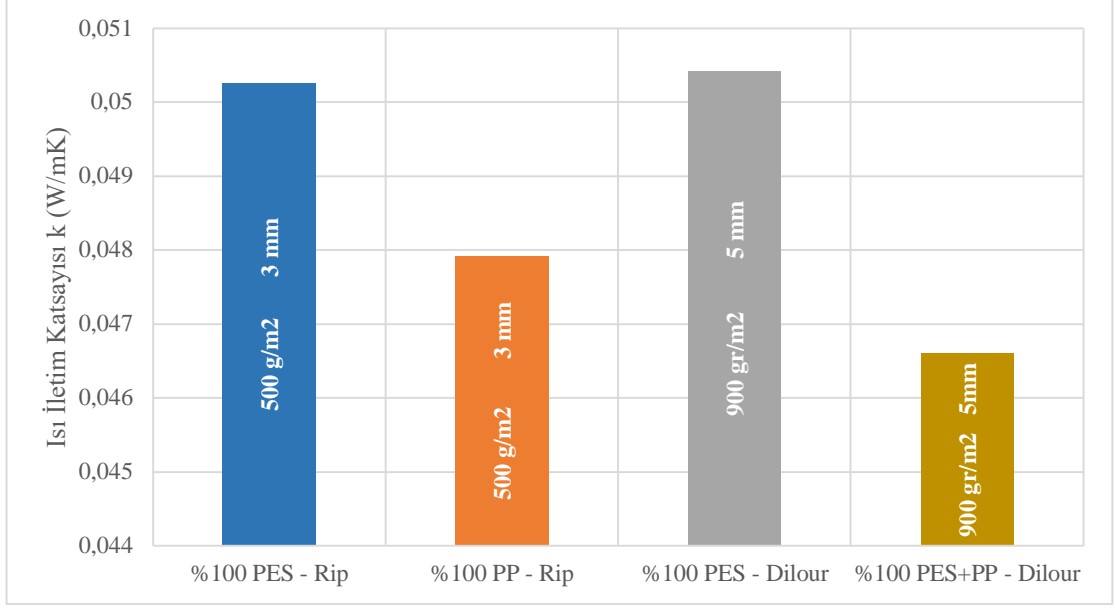
Bu ürünler için ısı iletim katsayısı sonuçları da Çizelge 4.1’de görülmektedir. Düşük ağırlıklı alana sahip karşılaştırmadan görülmektedir ki polipropilen kullanımı ısı iletim katsayısını düşürmektedir. Yüksek ağırlıklı alana sahip kumaşların karşılaştırılmasında da polipropilen katkılı polyester kumaşın ısı iletim katsayısının daha düşük olduğu görülmüştür. Buradan polipropilen kullanımının ısı iletiminde yalıtımı arttırdığı söylenebilmektedir.

**Çizelge 4.1.** Dokumasız iğnelenmiş ürünlere ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Numuneler	Ağırlıklı Alan	Kalınlık	<b>k (W/mK)</b>
% 100 PES - Rip	500 $g/m^2$	3 mm	<b>0,05026</b>
% 100 PP - Rip	500 $g/m^2$	3 mm	<b>0,04792</b>
% 100 PES - Dilour	900 $g/m^2$	5 mm	<b>0,05042</b>
% 70 PES+ % 30 PP - Dilour	900 $g/m^2$	5 mm	<b>0,0466</b>

Ayrıca Şekil 4.2’de ısı iletim katsayısı sonuçları görsel olarak belirtilmiştir. Ek 2’de gösterildiği üzere karışimsız PP ve PES karşılaştırılırsa PP’nin ısı iletim katsayısının daha düşük olduğu görülmektedir. PES ve PP elyaflarının dokumasız halde işlenmesiyle ve arka yüzeyine apre uygulanmasıyla elde sonuçlara göre de %100 PP elyaflarından oluşturulan ürün %100 PES elyaflarından oluşan üründen beklendiği üzere daha iyi bir ısı yalıtım performansı göstermiştir. 900  $g/m^2$  ağırlıklı alana sahip karışımlar incelenecek olursa PP elyafları katkılı ürününün ısı iletim katsayısının daha düşük olduğu yine görülmektedir. Buradan çıkartılacak sonuca göre PP elyafları ile üretilen dokumasız ürünler ve karışımlar ısı yalıtımını arttırmaktadır



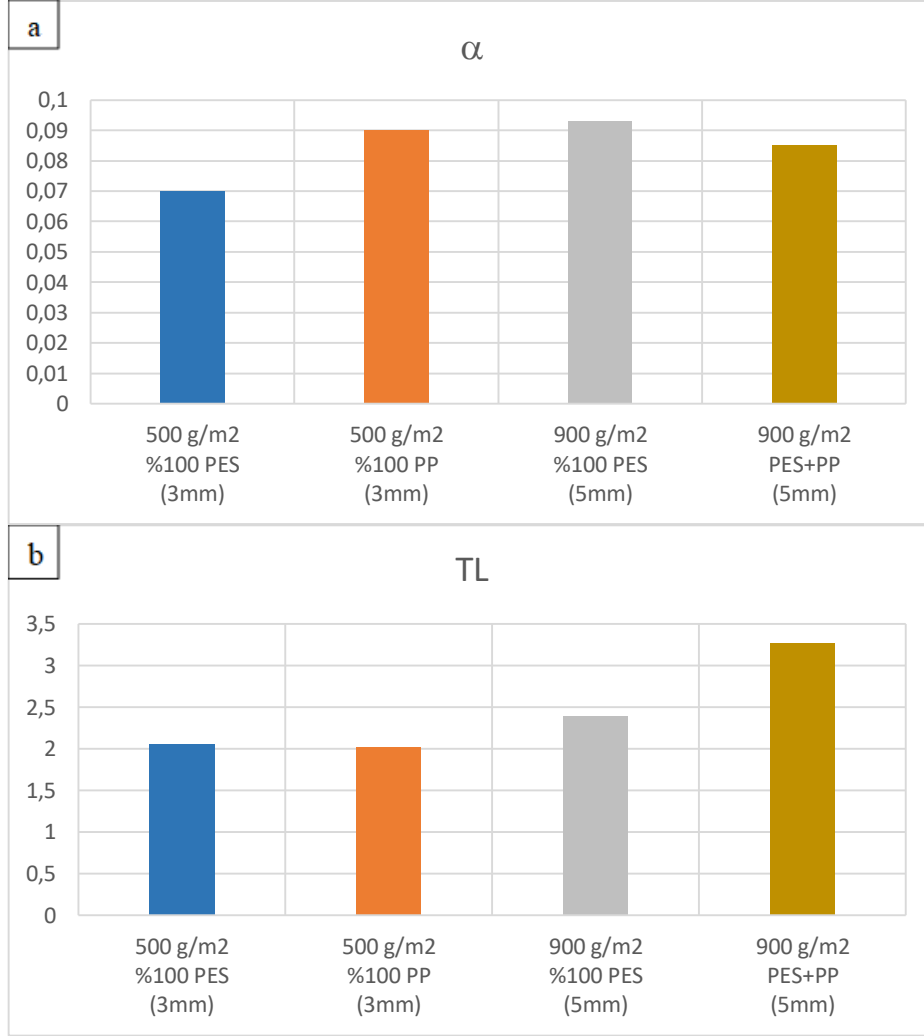


**Şekil 4.2.** Dokumasız iğnelenmiş ürünlere ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Şekil 4.1’de gösterilen eğriler bütün frekans bandını belirtmektedir. Şekil 4.3’te ise bu frekans bandının ortalaması gösterilmektedir. NVH çalışmalarında frekans bandına dair bu tür ortalamalar almak mantıklı değildir. Çünkü çalışmanın önceki bölümlerinde de aktarıldığı üzere farklı frekanslardaki seslere göre bu eğri oluşturulmaktadır. Bu sebeple sönümlenmek istenen sesin frekansına göre bu grafikler incelenmektedir ve eğrinin bütün frekans aralığını gösteren durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Fakat bu çalışmada akustik parametreler ve termal parametreler arasında bir bağlantı kurulmaya çalışıldığı için ortalama grafiği paylaşılma ihtiyacı duyulmuştur.

Şekil 4.3 incelenecek olursa ağırlık arttırılmasının akustik özellikleri iyileştirildiği görülmüştür. Ayrıca bunun yanı sıra malzeme içerikleri incelenecek olursa PP kullanımı da akustik özellikleri iyileştirmektedir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 aynı anda incelenecek olursa, PP kullanımı akustik ve termal yalıtım özelliklerini aynı anda iyileştirmektedir. Dokumasız ürünlerle ilgili olarak genel olarak, ağırlığın arttırılması, termal yalıtım özelliklerini nispeten kötüleştirirken, akustik yalıtım özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir. Çalışmanın giriş bölümünde belirtildiği üzere, Eyüpoğlu ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada buna paralel bir sonuç elde etmişlerdir.



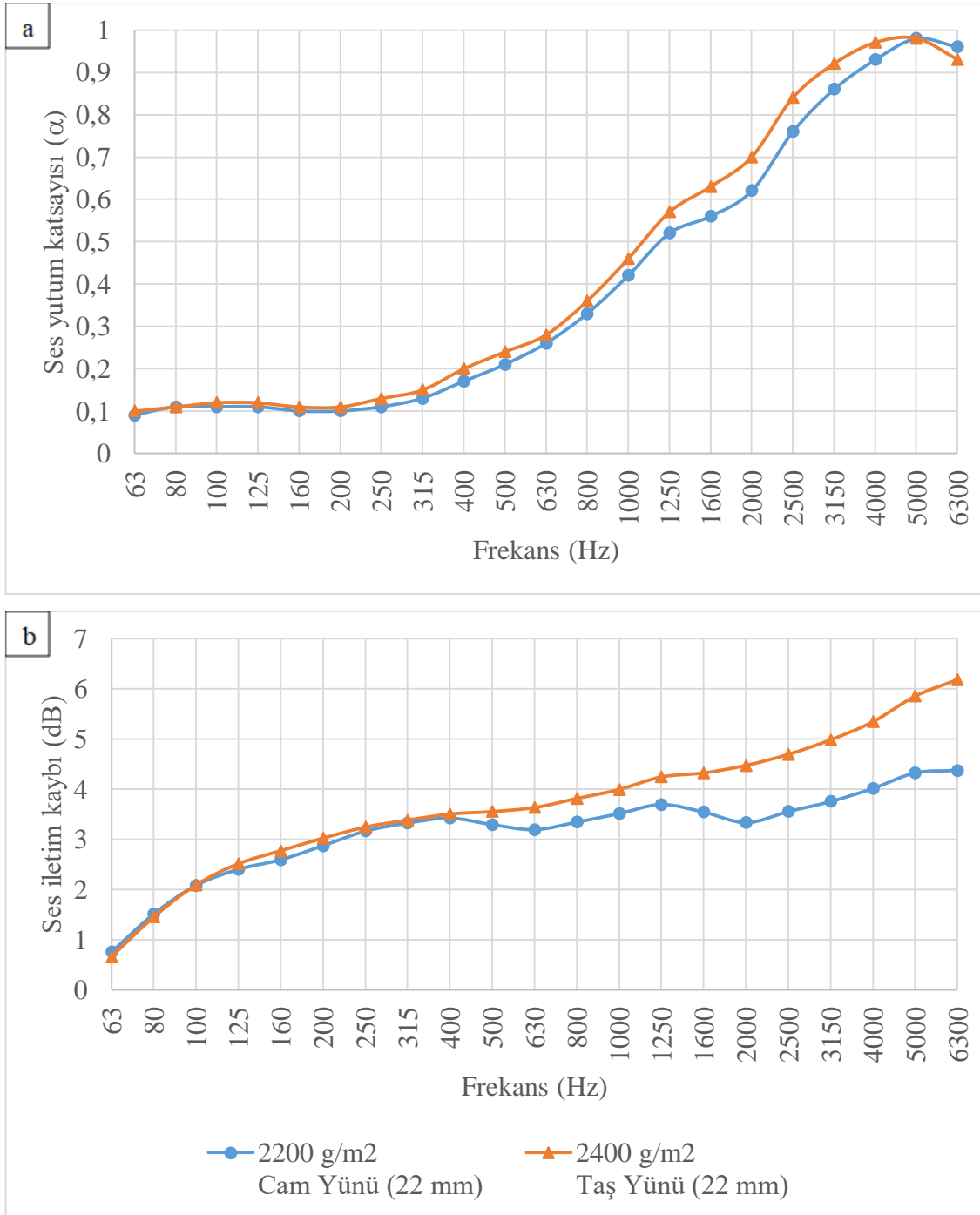
**Şekil 4.3.** Dokumasız iğnelenmiş ürünlerin frekans bandı ortalaması a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Bu bölüm için ağırlık artırılmasıyla akustik yalıtım özelliklerinin iyileştiği fakat termal yalıtım özelliklerinde kötüleşme olduğu görülmüştür.

#### 4.2. Mineral Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları

Minerallerden üretilen bu malzemelerde öncelikli olarak beklenti ısı yalıtımı ve ardından ses yutumdur. Burada kullanılan cam yünü  $2200 \text{ g/m}^2$  iken taş yünü  $2400 \text{ g/m}^2$  ağırlıklı alana sahiptir. Cam yünü ve taş yünü akustik açıdan karşılaştırılması Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.1'de kullanılan dokumasız ürünlerdeki 4 kHz üzerinde oluşan düşüş burada gözlemlenmemektedir çünkü kullanılan mineral malzemelerin kalınlığı 22 mm'dir. 22 mm kalınlığında seçilen malzemelerin ağırlıklı alanları birbirinden farklıdır.

Farklı seçilmesinin sebebi malzemelerin sıkıştırılmadan, olduğu haliyle seçilmesidir. Taş yünü zaten genellikle ağırlığı sebebiyle tercih edilmezken, maliyeti avantajıyla da ön plana çıkmaktadır.



**Şekil 4.4.** Cam ve taş yününe ait a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Cam yünü, üretilen camın liflere dönüştürüldüğü 1450°C’de eritilen, doğal ve geri dönüşümlü cam karışımından yapılmaktadır. Kaya veya taş yünü olarak adlandırılan malzeme, geri dönüştürülmüş bir malzeme olmayan, ancak bol miktarda bulunan volkanik kayalardan yapılmaktadır. Cam yünü gibi üretilen taş yününde bazalt yaklaşık 1500°C’ye ısıtılır ve bu da erimesine neden olmaktadır. Ses iletim özelliği oldukça düşük olan bu malzemelerin kullanım yerlerinde de zaten bu özellik aranmamaktadır. Aynı kalınlığa sahip cam yünü ve taş yünü karşılaştırmasında cam yünü malzemesi daha düşük ağırlığa sahip olduğu görülmektedir. Daha düşük ağırlıkta olsa bile ses yutumu katsayısı eğrisinde belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Cam yünü, taş yününe göre ses yutumu açısından performansı yüksek bir malzemedir. Mineral yapılı bu malzemeler akustik olarak, araçtaki süspansiyon sistemi gibi davranan kütle-yay prensibiyle çalışan sistemlerde, yayı oluşturarak mükemmel bir gürültü azaltma sağlarlar ve yünün lifli doğası nedeniyle, yüksek frekanslı gürültü de ses dalgalarını yansıtma ile etkisiz hale getirmektedirler.

Mineralden üretilen yalıtım malzemelerine ait ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 4.4’te görülmektedir.

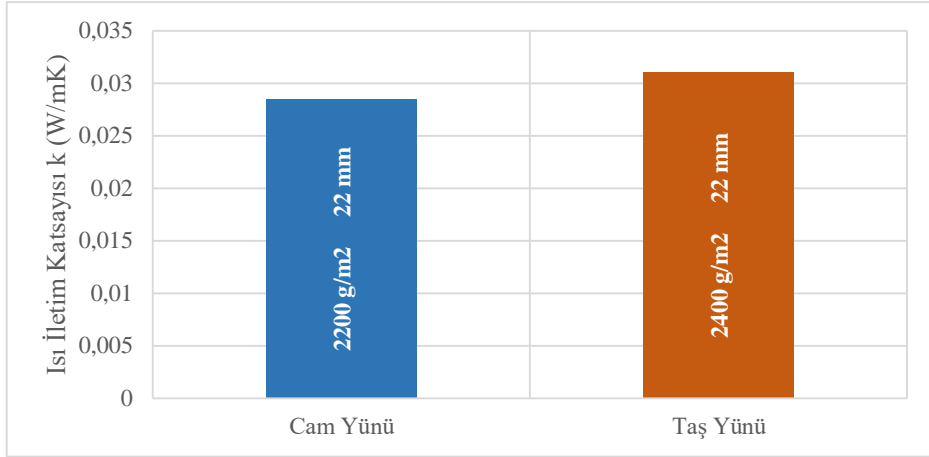
**Çizelge 4.2** Cam yünü ve taş yünü malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Numuneler	Ağırlıklı Alan	Kalınlık	<b>k (W/mK)</b>
Cam Yünü	2200 $g/m^2$	22 mm	<b>0,0285</b>
Taş Yünü	2400 $g/m^2$	22 mm	<b>0,0311</b>

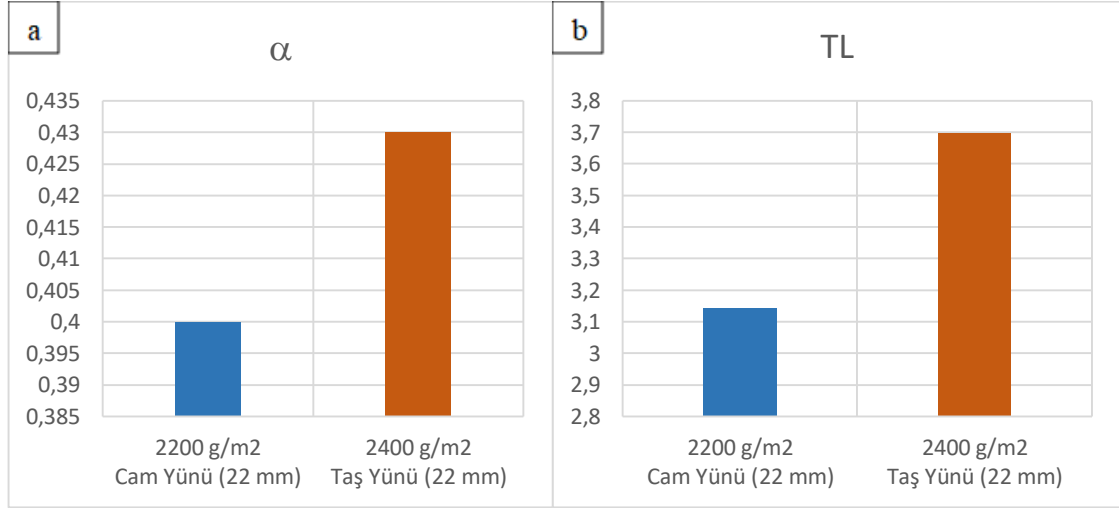
Ayrıca Şekil 4.5’te mineral malzemelerin ısı iletim katsayısı sonuçları belirtilmiştir. Burada yapılan karşılaştırma sadece malzeme içeriğiyle ilgili olacaktır. Dokumasız ürünlerdeki gibi ağırlıklı alan karşılaştırması yapılmayacaktır. Şekil 4.5 incelenecek olursa aynı kalınlıktaki cam yünü taş yününe göre daha az ağırlığa sahip olmasına rağmen daha düşük bir ısı iletim katsayısına sahiptir. Bu sebeple ısı yalıtımı performansı taş yününe göre daha yüksektir. Bu mineral yapılı malzemeler özellikle yüksek ısı yalıtımı sebebiyle tercih edilmektedir.

Ayrıca Şekil 4.6 incelenecek olursa, frekans bandının ortalaması alındığında aradaki ortalama değer farkının ses yutumu katsayısı için 0,03 olduğu görülmektedir ki bu çok düşük bir değerdir. Burada cam yününe ağırlığının daha düşük olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.5 birlikte incelenecek olursa, cam yününden oluşturulan numunelerin akustik ve termal özellikler açısından daha iyi yalıtıma sahip olduğu görülmektedir. Buradaki karşılaştırma sonucunda yapılacak seçimler için malzemenin fiyatı, ağırlığı gibi diğer özellikleri dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.5. Mineral malzemelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları



Şekil 4.6. Cam ve taş yününe ait frekans bandı ortalaması a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Piyasadaki yaygın bir yanlış, camın yanması ve taşın yanmamasıdır. Bu doğru değildir ve her iki ürün de A1 yanmazdır. Bu malzemelerin yanmazlık özellikleri en önemli tercih sebebidir. Doğal olarak, ısıyı doğal taşınımıyla etkin bir şekilde aktarabilen küçük hücrelerde havanın toplanması esasına göre çalışmaktadırlar. Ayrıca bu malzemeler suya

karşı da dayanım özelliğine sahiptirler. Otomotiv sektöründe bu özellikleri ile suya girip çıkan arazi araçlarında özellikle tercih edilmektedirler.

Her iki malzemenin de aynı yoğunlukta benzer basınç dayanımlarına sahip olmalarına rağmen, taş kg bazında daha ucuzdur. Bu nedenle, taş madeni yünü en rekabetçi çözüm olarak kendini ortaya çıkarmaktadır.

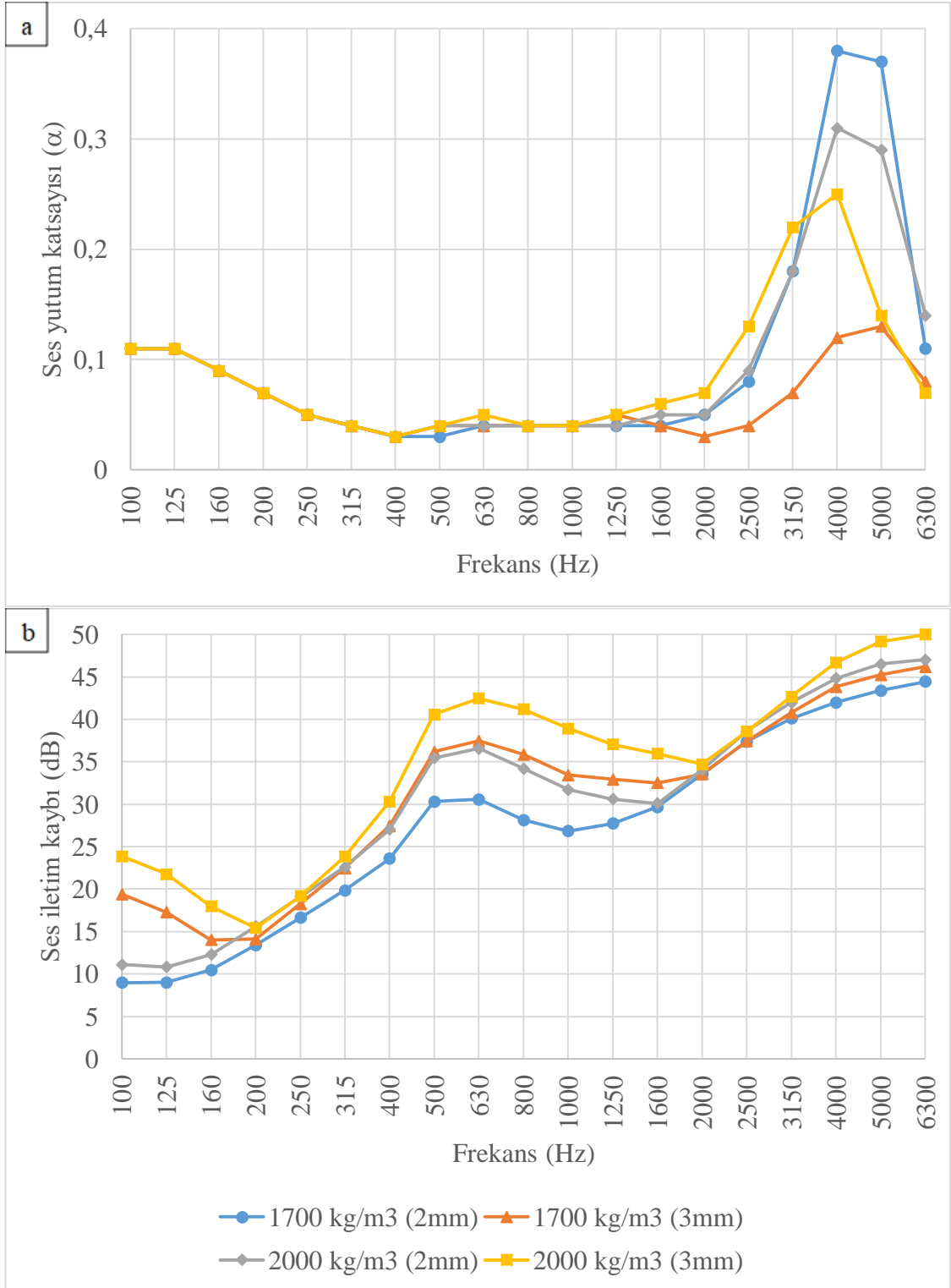
### **4.3. Ağır Katman Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları**

Deneysel çalışmada ağır katman malzemesine ait ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısı değerleri elde edilmiştir ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Burada aynı malzeme için kalınlık sabit tutulup ağırlıklı alan değiştirilerek ve ağırlıklı alan sabit tutulup kalınlık değiştirilerek iki farklı karşılaştırma elde edilmiştir.

Ağır katman karışımı, visko elastik bir malzeme olup bu çalışmada kullanılan ve genellikle elyaf yapısında olan malzemelerden farklıdır. Kullanılan ağır katman karışımlarının oranları bir karıştırıcıda hazırlanarak plakalar halinde ekstrüzyon makinesinden ürün olarak alınmıştır. Ağır katman malzemesi otomotiv sektöründe titreşimi azaltması ve akustik açıdan da sese karşı bariyer görevi görmesi sebebiyle tercih edilmektedir. Az gözenekli yapısı ile bariyer görevini sağlamaktadır.

Bulgular incelenecek olursa Şekil 4.7’de açıkça görülmektedir ki malzeme az gözenekli yapısı ile bariyer görevini yerine getirmiştir ve ses iletim kaybında iyi sonuçlar vermiştir. Ağır katman malzemesi için kalınlığın veya ağırlıklı alanın artırılması ile ses iletim kaybında bir iyileşme gözlenmektedir. En ağır ve en kalın malzemede en iyi ses iletim kaybı sonucu elde edilmiştir. Ses iletim kaybı grafiği incelenecek olursa 630-2000 Hz aralığı hariç eğride genel olarak bir yükselme gözlemlenmektedir. 630-2000 Hz aralığı için malzeme yapısından kaynaklanan doğal frekanslarının aktif olduğu söylenebilir. Burada malzemeye ait elastisite modülü ve sönüm oranı önemli rol oynamaktadır.

Ses yutum kaybında ise yapısında az oranda gözenek bulunması bu malzemenin ses yutumu için çalışmadığı söylenebilir. Fakat yine de ses yutum katsayısı açısından incelenecek olursa 2000 Hz ve üzerindeki yüksek frekanslara çıkıldığında az da olsa ses yutum kabiliyetinin olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.7.** Ağır katman karışımların a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

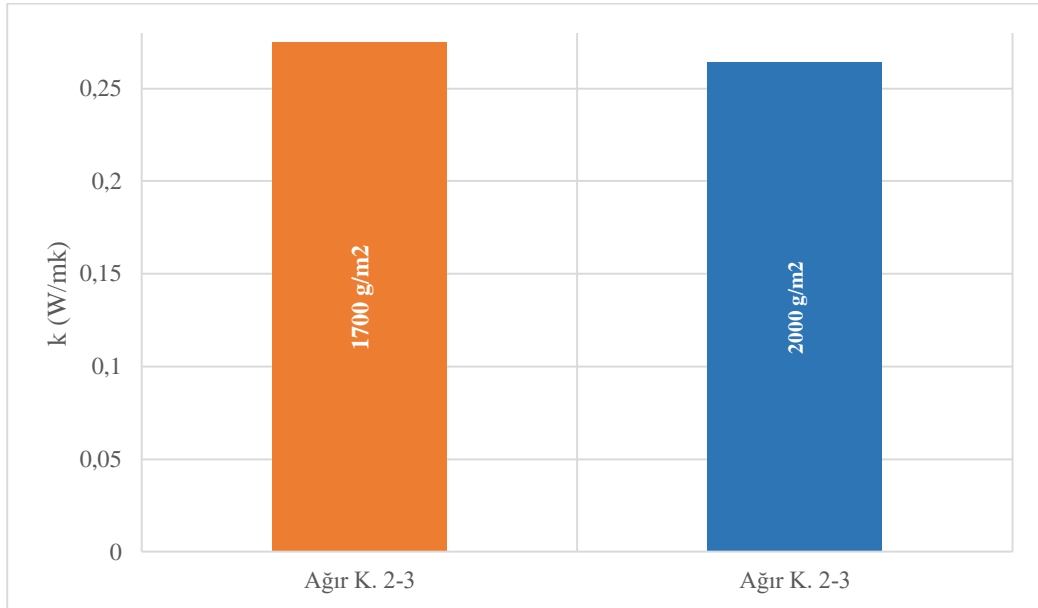
Ağır katman malzemeleri için elde edilen ısı iletim katsayısı sonuçları Çizelge 4.3'te yer almaktadır. Burada Alambeta cihazının özelliklerinden bahsetmek gerekir ki cihaz

genellikle elyaf tipli tekstil malzemelerinde ölçüm yapmak için kullanışlıdır. Aralık incelenirse, malzemenin ağırlıklı alanının artırılması ısı iletim katsayısının düşmesine sebep olduğu görülebilir fakat yine de belirgin bir farklılıktan söz edilememektedir. Zaten diğer malzemelere göre bakılacak olursa ısı iletim katsayısı epey yüksektir ve bu sebeple ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmamaktadır. Burada, gözenek yapısının elyaf türevli malzemelerden farklı olmasından dolayı böyle bir sonuç gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.3.** Ağır katman karışımı malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Numuneler	Ağırlıklı Alan	k (W/mK)
EVA+PVC	1700 kg/m <sup>3</sup>	<b>0,254-0,275</b>
EVA+PVC	2000 kg/m <sup>3</sup>	<b>0,244-0,264</b>

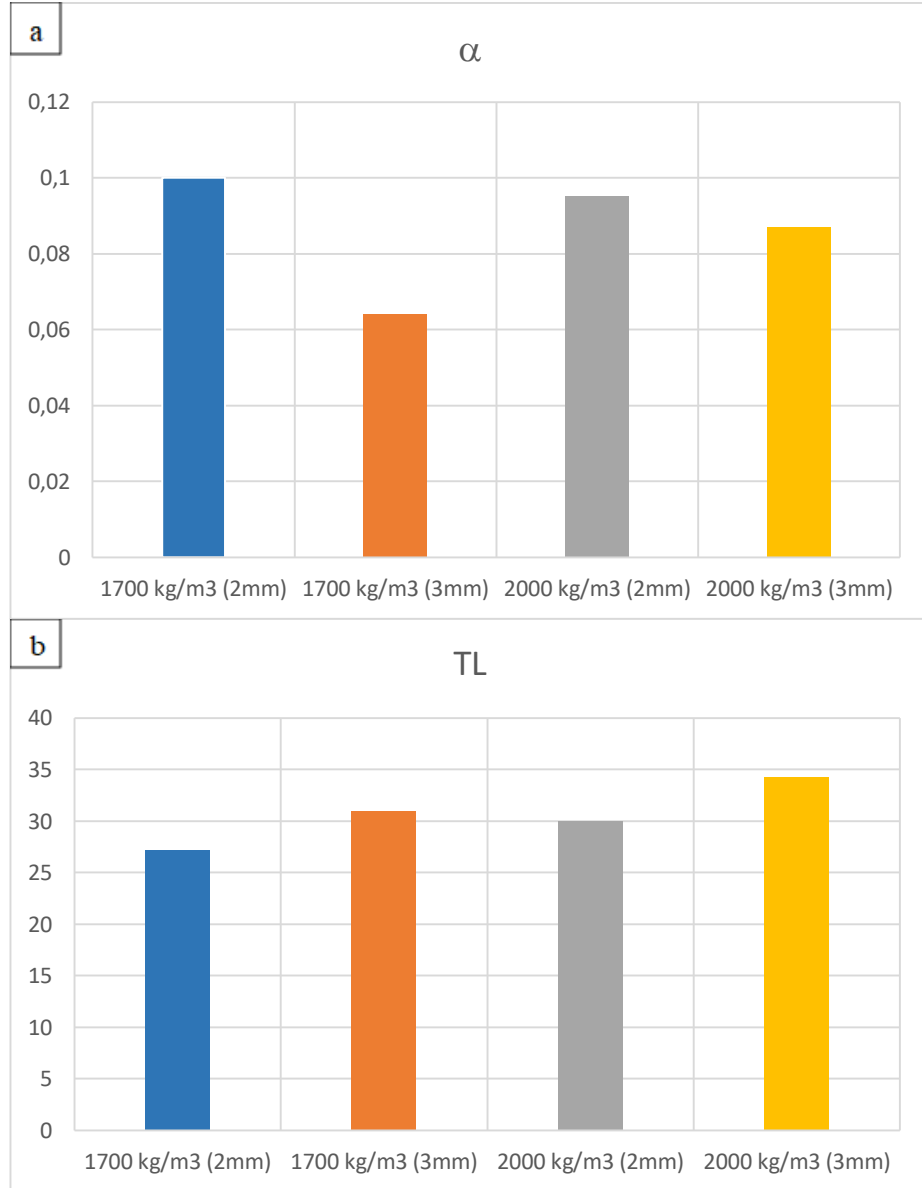
Ayrıca Şekil 4.8’de ağır katman malzemelerin ısı iletim katsayısı sonuçları grafik olarak belirtilmiştir. Numune malzeme ağırlığının artırılması ısı iletim katsayısını düşürmektedir.



**Şekil 4.8.** Ağır katman karışımlarına ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Ağır katman karışımları ses iletim kaybı için tercih edildiğinden dolayı Şekil 4.9b incelenecek olursa, malzemenin ağırlığının veya kalınlığının artırılmasının akustik yalıtımı iyileştirdiği gözlemlenmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere ortalaması alınmış değerler üzerinden de aynı yorumu yapmak mümkündür, ses iletim kaybının artırılması için en kalın ve en ağır malzeme tercih edilmelidir.





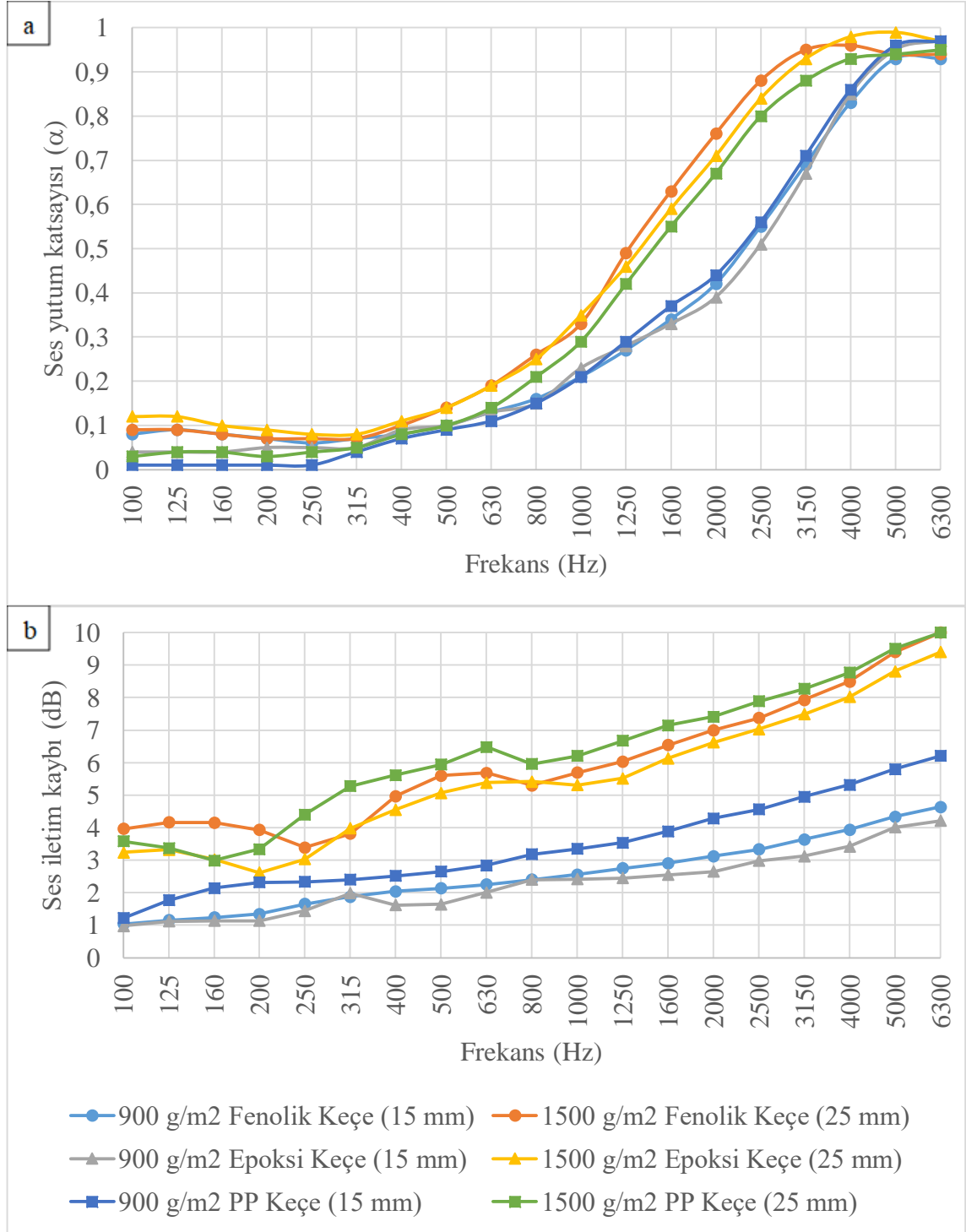
**Şekil 4.9.** Ağır katman karışımların a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Ağır katman malzemelerinin akustik ve termal özellikleri birlikte incelenecek olursa, ağırlığın artırılmasıyla akustik ve termal yalıtım özelliklerinin her ikisi de iyileşmektedir.

Daha kalın malzemelerin kullanılmasıyla elde edilen değerlerdeki iyileşmeler açıktır fakat malzeme ağırlığı ve kalınlığı arttırıldıkça maliyet de orantılı olarak artmaktadır. Bu sebeple otomotiv ana sanayinin beklentisi olan akustik ve termal hedeflere en yakın malzemenin seçilmesi önem kazanmaktadır. Ayrıca Alambeta cihazının genel olarak lifli malzeme ölçümlerinde kullanıldığı ve ağır katman karışımının termal açıdan yalıtkan malzeme davranışı göstermediği unutulmamalıdır.

#### 4.4. Keçe Tipi Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları

Farklı ortalama ağırlıklı alan ve farklı kalınlıktaki keçelere ait ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısı değerleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Keçe malzemelerinin a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

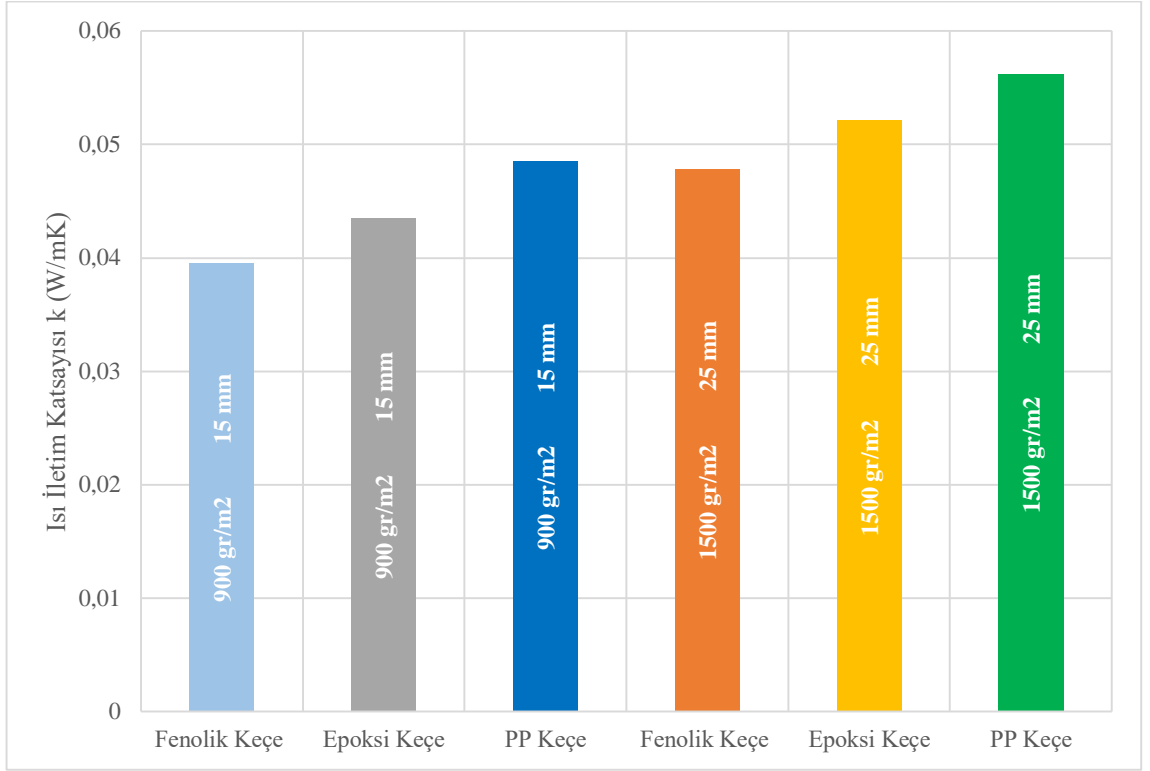
Burada temelde 3 farklı tipte keçe kullanılmıştır. Bu keçeler reçinesine ve içeriğine göre sınıflandırılmıştır. Büyük bir hatta beslenen jut, koton, PP gibi malzemeler karıştırılarak hat başlamaktadır. Daha sonra reçine ile bu malzemeler birbirlerine tutunmaktadırlar. Plaka halinde olan malzemeler hattın sonundan kesilerek çıkartılmaktadır. Ağırlıklı alan olarak  $900 \text{ g/m}^2$  ve  $1500 \text{ g/m}^2$  kullanılması sonucunda eğri davranışları birbirlerine benzer hareket etmiştir. Daha kalın ve ağır olan numuneler ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısında beklenildiği üzere daha iyi sonuç vermiştir. Akustik parametreler için elde edilen sonuçlardan hangi tip keçenin birbirine göre iyi olduğunu söylemek bu kısım için mantıksızdır. Çünkü frekans bandındaki bazı bölgelere ve keçe tipine göre farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Keçe tipleri için elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki fenolik reçineli keçe ısı iletim katsayısı en düşük olan keçe türüdür. Ağırlıklı alanın artması ile ısı iletim katsayısının elyaf keçe malzemeleri için fazla olmasa da yükseldiği gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.4.** Keçe malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Numuneler	Ağırlıklı Alan	Kalınlık	<b>k (W/mK)</b>
Epoksi Keçe	$900 \text{ g/m}^2$	15 mm	<b>0,04348</b>
Fenolik Keçe	$900 \text{ g/m}^2$	15 mm	<b>0,0395</b>
PP Keçe	$900 \text{ g/m}^2$	15 mm	<b>0,04854</b>
Epoksi Keçe	$1500 \text{ g/m}^2$	25 mm	<b>0,05214</b>
Fenolik Keçe	$1500 \text{ g/m}^2$	25 mm	<b>0,0478</b>
PP Keçe	$1500 \text{ g/m}^2$	25 mm	<b>0,05612</b>

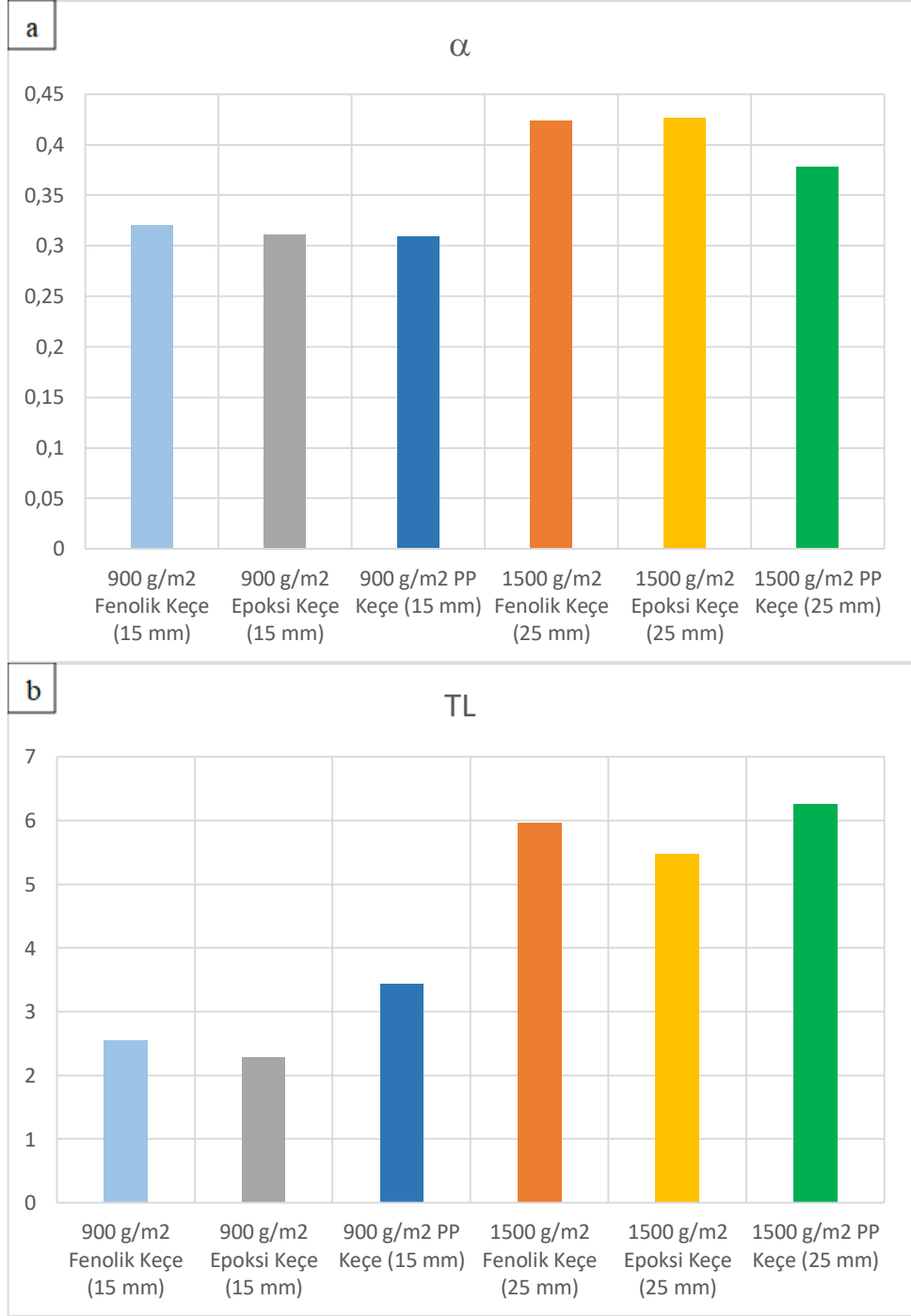
Şekil 4.11'de ısı iletim katsayıları sütun grafiği halinde gösterilmiştir. Bu grafik incelenecek olursa, malzemelerin ağırlığının artırılmasının ısı iletim katsayısını yükselttiği görülmektedir. Reçine bağlayıcısı olarak fenolik kullanılmasıyla elde edilen keçeler en düşük ısı iletim katsayısına sahiptir ve Ek 2'de fenolik reçinenin ısı iletim katsayısının daha düşük olduğu da görülmektedir. PP elyafli keçenin ısı iletim katsayısının en yüksek çıkmasının sebebi içerisindeki yün koton oranının az olmasıdır. Keçe içeriği, çalışma ortamına ve müşteri isteklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Burada Ek 2'de görülen, keçeyi oluşturan elyaflardan ve reçinelerden en düşük ısı iletim katsayısına sahip olanın yün koton olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan numunelerin içeriği net olarak bilinmemektedir.



**Şekil 4.11.** Keçe tipi malzemelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Şekil 4.12 incelenecek olursa, keçe tipindeki malzemelerin akustik özelliklerinin frekans bandı boyunca alınan ortalaması belirtilmiştir. Bu ortalamaya dayanılarak malzemenin ağırlığının ve kalınlığının artırılmasının akustik özelliklerde iyileştirme sağladığı gözlemlenmiştir. Ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı eğrilerinin ortalamaları birbirleriyle karşılaştırılacak olursa, numune bazlı olarak ters orantı olduğu görülmektedir. Burada malzemelerin akustik Biot parametreleri söz konusudur. Malzemenin gözenekliliği arttırıldıkça ses yutum katsayısı artarken, ağırlığı arttırıldıkça ses iletim kaybı artmaktadır.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 birlikte incelenecek olursa, malzemelerin ağırlığının arttırılmasının akustik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenirken, ısı iletim katsayısını azalttığı görülmektedir. Keçeler için elde edilen sonuçlar dokumasız ürünler ve ağır katman karışımlar için elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Malzemelerin ağırlığının arttırılmasıyla oluşan termal ve akustik değişimler belirtilmiştir. Kalınlığın arttırılmasıyla akustik özelliklerin iyileşmesi hakkında bahsedilmiştir.

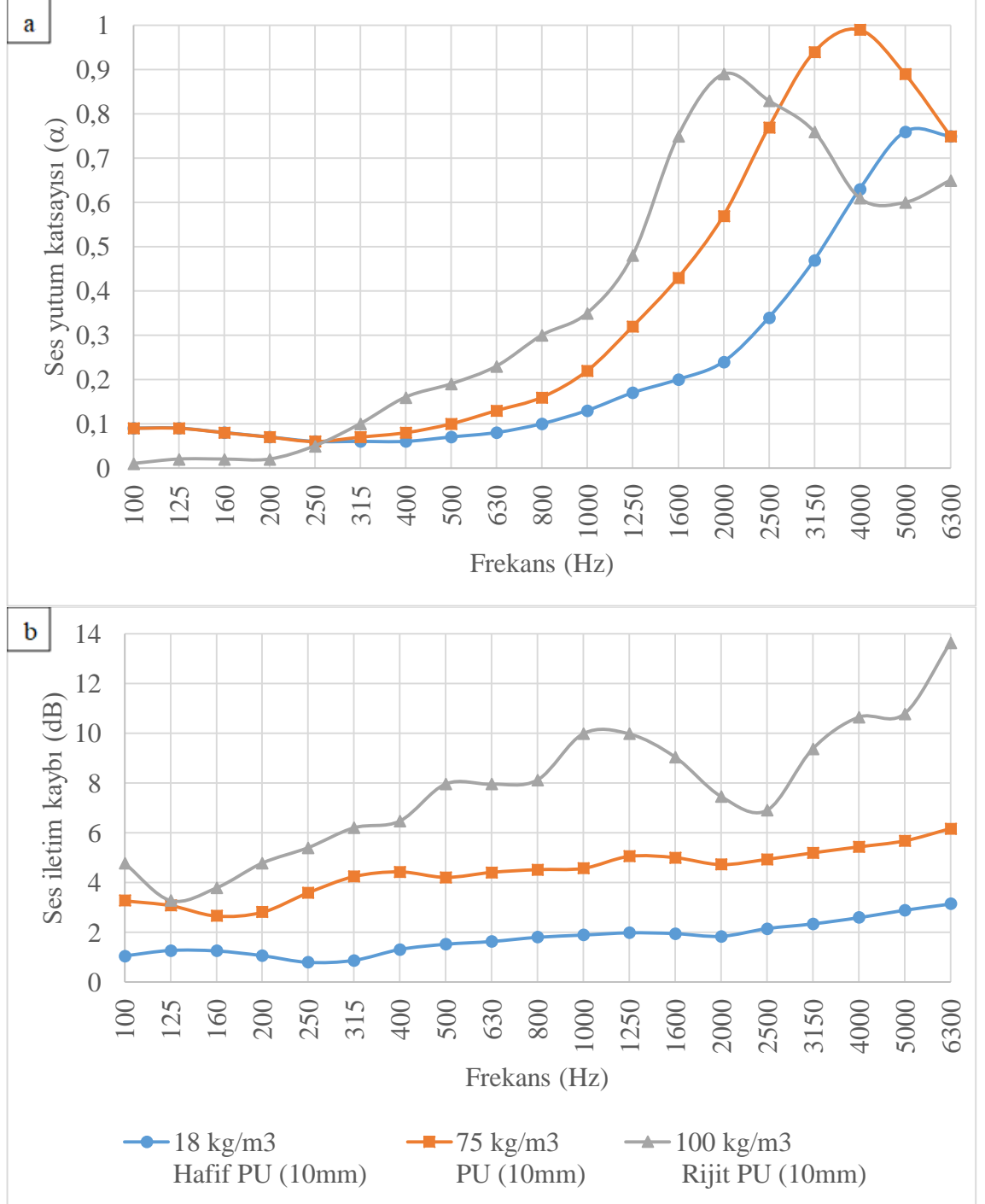


**Şekil 4.12.** Keçe malzemelerinin frekans bandı ortalama a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Keçe tipindeki malzemeler genellikle geri dönüşüm ürünlerinden elde edildiği için maliyet açısından uygundur. Bu tür malzemelerin yanmazlık özelliği açısından da kullanılması caziptir. Bu sebeple otomotiv sektöründeki NVH uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat suya karşı dayanıklı değildirler.

#### 4.5. Poliüretan Malzemelere Ait Ölçüm Sonuçları

Poliüretan malzemelerine ait ses iletim kaybı ve ses yutum katsayıları sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Poliüretan malzemelerinin a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları

Üretilen numunelerden hafif poliüretan yüksek basınçlı enjeksiyon ile püskürtülerek döküm haline getirilmiş ve daha sonra hızar testere ile kesilerek istenen boyuta getirilmiştir. Normal yoğunluktaki poliüretan yüksek basınçlı enjeksiyon kapasiteli bir hat sayesinde istenen kalınlığa sahip bir kalıp içerisinde dökülmüştür ve daha sonra uygun ebatlarda kesilmiştir. Rijit poliüretan ise üretim teknolojisi sebebiyle elle karıştırılarak 10 mm sabit kalınlıklı bir kalıpta hazırlanmıştır.

Şekil 4.13 ses yutum katsayısı açısından incelenecek olursa, yüksek frekanslara gidildikçe ve malzeme yoğunluğu arttırıldıkça ses yutum katsayısında düşüş gözlemlenmektedir. Orta seviyedeki frekanslarda ise yüksek yoğunluk ses yutum katsayısını iyileştirmektedir.

Şekil 4.13 ses iletim kaybı açısından incelenecek olursa, aynı kalınlıkta yoğunluğu arttırılan malzemenin ses yalıtımı özelliklerinin artması sebebiyle iyileşme gözlemlenmektedir. Burada  $100 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğundaki numuneye ait ses iletim kaybı eğrisinde diğer yoğunluklardaki eğrilerden farklı olarak ani yükseliş ve düşüşler gözlemlenmektedir. Bunun sebebi  $100 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğundaki numunenin elle dökülmüş bir poliüretan olmasıdır. Yapının elle dökülmüş olması içerisindeki gözenekliliğinden, kıvrımlılığına kadar birçok parametreyi etkilemiştir. Bu sebeple homojen bir iç yapı sağlanamamış ve bu sonuçlara yansımıştır.

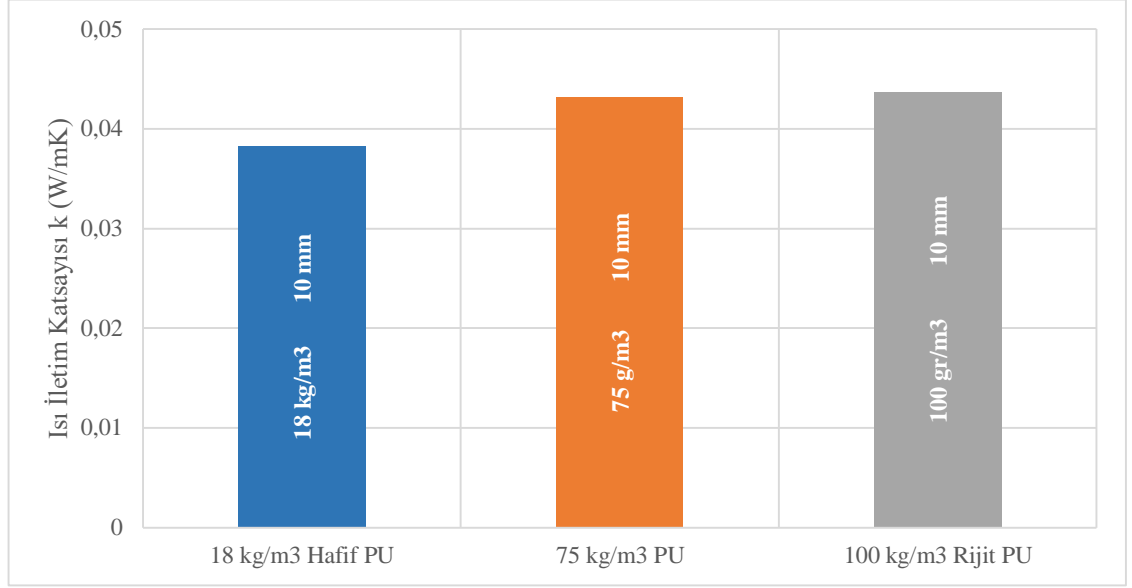
Numunelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Hafif poliüretan karışımı malzeme özelliği olarak daha yumuşaktır. Büyük ve yüksek oranda gözenek yapısına sahiptir. Bu sebeple ısı iletim katsayısı normal poliüretan türlerine göre daha düşük sonuç vermiştir. Yüksek yoğunluklu poliüretan türleri arasında ise belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir.

**Çizelge 4.5.** Poliüretan malzemelerine ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Numuneler	Yoğunluk	Kalınlık	<b>k (W/mK)</b>
Hafif PU	$18 \text{ kg/m}^3$	10 mm	<b>0,03828</b>
PU	$75 \text{ kg/m}^3$	10 mm	<b>0,04326</b>
Rijit PU	$100 \text{ kg/m}^3$	10 mm	<b>0,0437</b>

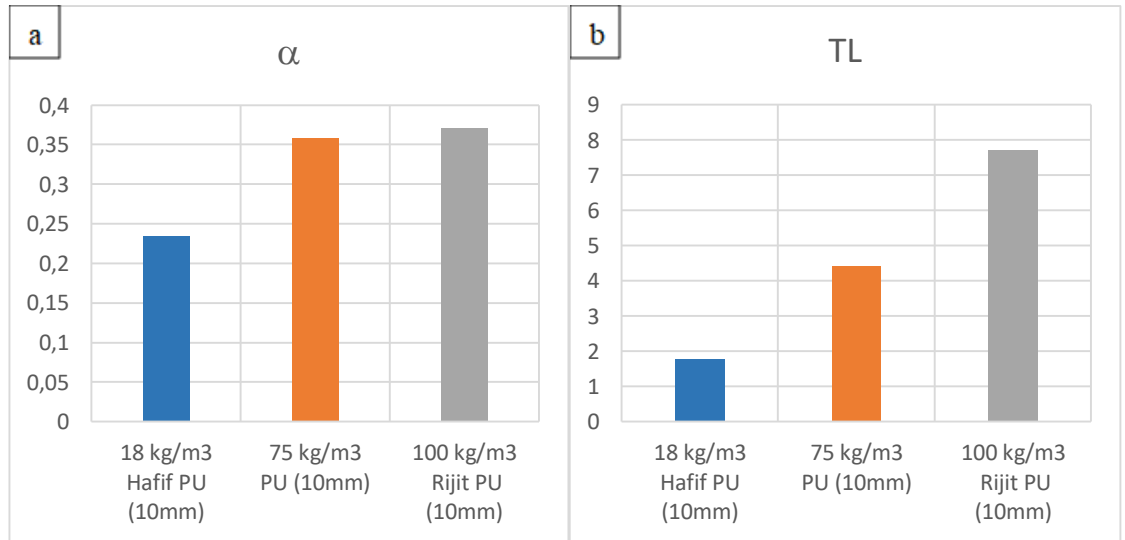
Ayrıca Şekil 4.14'te mineral malzemelerin ısı iletim katsayısı sonuçları sütun grafiği olarak belirtilmiştir. Bu sonuçlardan da açıkça görülmektedir ki poliüretan yoğunluğunun

75  $kg/m^3$ 'den 100  $kg/m^3$ 'e çıkartılmasıyla ısı iletim katsayısı artmıştır. Hafif poliüretanın gözenekli yapısı Şekil 3.6k'da gözükmemektedir. Bu gözenekli yapının zaten ısıyı iletmeyeceği beklenen bir durumdur.



Şekil 4.14. Poliüretan malzemelere ait ısı iletim katsayısı sonuçları

Şekil 4.15 ve Şekil 4.14 birlikte incelenecek olursa hafif poliüretan haricindeki malzemeler için ağırlığın artırılmasının akustik özellikleri iyileştirdiği fakat ısı iletim katsayısını yükselterek yalıtım özelliklerini kötüleştirebileceği gözlemlenmiştir.

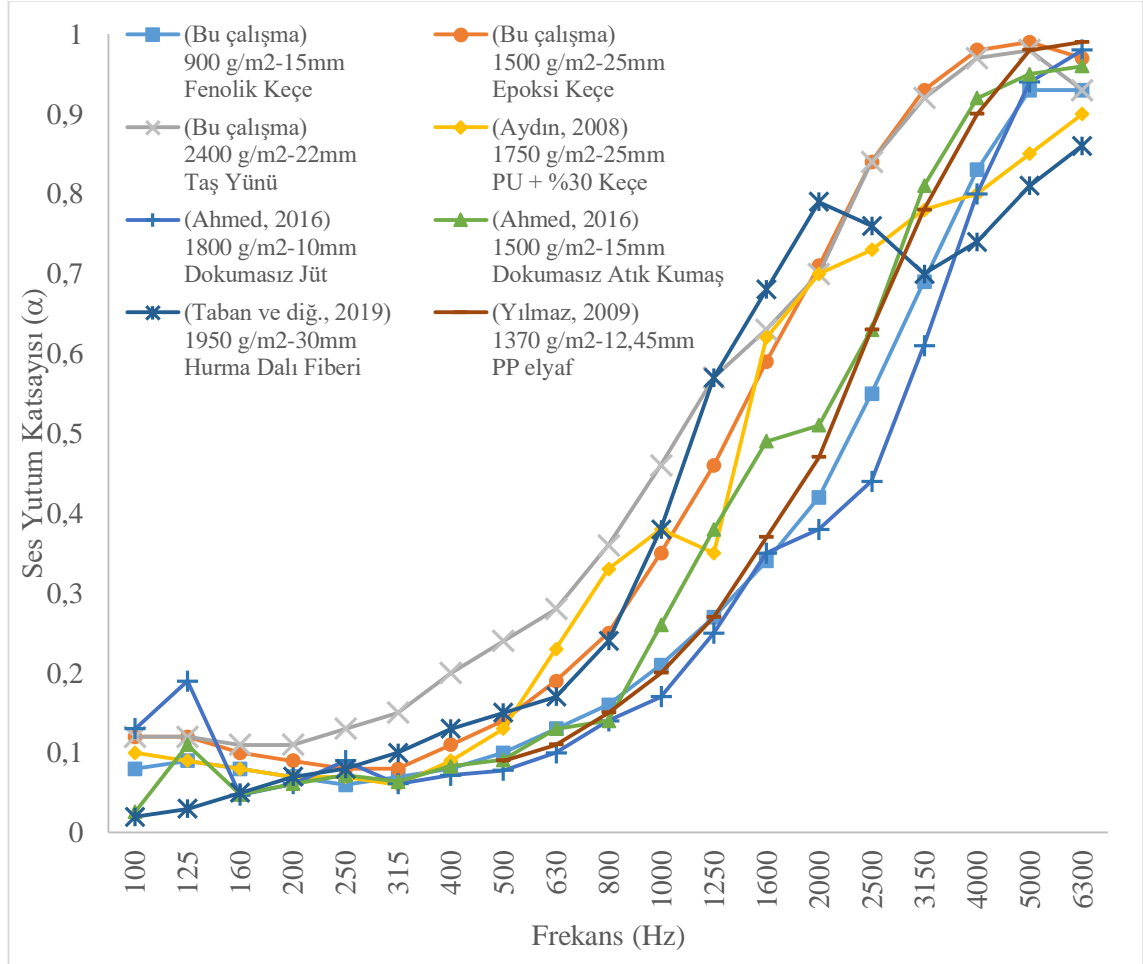


Şekil 4.15. Poliüretan malzemelerinin frekans bandı ortalaması a) ses yutum katsayısı b) ses iletim kaybı sonuçları



#### 4.6. Literatürde Yer Alan Ses Yutum Katsayısı Verileriyle Karşılaştırma

Literatürde verileri paylaşılmış gözenekli, lifli olarak sınıflandırılabilir malzemeler ile bu çalışmada yapılan ölçüm sonuçları Şekil 4.16’da karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.16.** Literatürde yer alan ses yutum verileri ile bu çalışmadaki sonuçların karşılaştırılması (Aydın, 2008, Ahmed, 2016, Taban ve ark., 2019, Yılmaz, 2009)

Şekil 4.16’da yapılan çalışmaların literatürdeki verilerle karşılaştırılması göstermektedir ki Şekil 2.5’te yer alan gözenekli malzeme davranışları ile ilgili kısım ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada yer alan numunelerle birebir özelliklerdeki numunelere ait ses yutum katsayısı verilerini literatürde bulmak zordur. Üretim teknolojisi, lif uzunluğu, numune kalınlığı, lif tipi gibi birçok parametre bulunmaktadır. Zaten çalışmanın amaçlarından birisi yapılan bu ölçüm sonuçlarının literatürde yer almasıdır. Şekil 4.16’ya göre lifli veya kalınlığı farklı olan numunelerin ses yutum eğrisi davranışları bu çalışmada yer alan lifli gözenekli malzemelerin ses yutum eğrisi davranışları ile uyumludur.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinin beklentileri doğrultusunda kullanılan yalıtım amaçlı mühendislik malzemeleri ele alınmıştır. Günümüz tüketicileri, otomobillerinden en iyi termal ve akustik yalıtım performansını beklemektedir. Bu sebeple otomotiv üreticileri bu malzemelerin araştırılmasına ve karşılaştırılarak seçilmesine yönelmektedir. Otomotiv endüstrisinde malzeme maliyetinin ve ağırlığının azaltılmasına yönelik mevcut eğilim ve artan araç NVH özelliklerine yönelik artan talepler, ses yutumu ve iletim kaybının fiziksel olarak doğru ve etkin bir şekilde oluşturulmasına izin veren tasarım metotlarının gerekliliğini belirtmektedir. Geliştirilen tüm malzemeler tasarım ve analiz giriş parametresi kullanılmak üzere sürekli olarak ölçülerek güncel tutulmalıdır.

Çalışma kapsamında kullanılan akustik ve termal parametre ölçüm yöntemleri otomotiv üreticileri tarafından yapılan testlerde kullanılan yöntemlerdir. Alfa kabin ile çok yönlü ses dalgaları altında malzeme parametreleri belirlense de empedans tüpü ile ölçüm yöntemi, numune hazırlanmasının kolaylığı sebebiyle sıklıkla tercih edilen bir malzeme parametresi belirleme yaklaşımıdır. Aynı şekilde alambeta cihazı da ölçüm sürelerinin kısalığı ve numune hazırlanmasının kolaylığı sebebiyle tercih edilmektedir.

Çalışmanın deneysel kısmında dokumasız iğnelenmiş ürünler, ağır katman karışımları, mineral katkılı malzemeler, geri dönüşüm keçeler, köpük halde poliüretan malzemeler kullanılmıştır. Çalışmada empedans tüpü test metodu, uluslararası standartlara uygun olarak kullanılmıştır. Öncelikle 29 mm ve 100 mm çapında numuneler hazırlanmıştır. Malzemelere ait ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısı değerleri bu çaplardaki tüplerle ölçülmüştür. Ses iletim kaybı için 4 mikrofon ve ses yutum katsayısı için 2 mikrofon metodu kullanılmıştır. Bu sayede malzemelerin kalınlığının, içeriğinin ve ağırlıklı alanlarının değişimiyle akustik parametrelere olan etkisi incelenmiştir. Daha sonra aynı malzemelerden 120 mm çapında numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri de alambeta cihazı ile ölçülmüştür.

Sonuç olarak elde edilen bilgiler doğrultusunda akustik ve termal konforu aynı anda sağlayabilecek malzemeler incelenmiştir. Bu çalışmalar yapılırken izolatörler konusunda bilgi birikiminin artırılması ve araç geliştirme çalışmalarında kullanılması amaçlanmıştır.

Dokumasız ürünlerde polipropilen katkısının akustik ve termal yalıtım açısından iyileştirme sağladığı görülmüştür. Ayrıca kalınlığın ve ağırlıklı alanın artırılmasıyla dokumasız ürünlerde akustik yalıtım özellikleri iyileşmektedir, sadece ağırlığın artması da ısı iletim katsayısını yükseltmektedir. Ağır katman malzemeleri ses iletim kaybı yüksek olan malzemeler oldukları için sese karşı bariyer olarak çalışmaktadır. Ağır katman karışımlarının ağırlıklı alanı artırıldıkça bariyer etkisi artmaktadır ve ses yalıtım özellikleri iyileşmektedir. Ayrıca ağır katman karışımları diğer malzemelere oranla yüksek ısı iletim katsayısı özelliğine sahip olduğu için termal yalıtım özelliğinde etkin olmamaktadır. Poliüretan malzemeleri incelenecek olursa yoğunluğun artırılması ile ses iletim kaybı özelliği iyileşmiştir, ses yutumu kaybı özelliği ise orta seviye frekanslar için iyileşmiştir, yüksek seviyeli frekanslarda bir düşüş görülmektedir. Poliüretan malzemelerin yoğunluğu artırıldıkça ısı iletim katsayısı yükselmiştir. Cam yünü aynı kalınlıkta ve daha düşük ağırlıklı alana sahip iken ses yalıtımı açısından taş yünü ile rekabet edebilir haldedir. Isı yalıtımı açısından incelenecek olursa cam yünü malzemesinin ısı iletim katsayısı da daha düşük çıkmıştır. Keçe tipi malzemelerde en iyi ses iletim kaybı özelliğini  $1500 \text{ g/m}^2$ 'lik PP keçe göstermiştir, en iyi ses yutumu katsayısı özelliğini  $1500 \text{ g/m}^2$ 'lik fenolik keçe göstermiştir, kalınlıktan bağımsız olarak en iyi ısı yalıtımı özelliğini  $900 \text{ g/m}^2$ 'lik fenolik keçe göstermiştir. Keçe malzemelerinde reçinenin değişiminin belirgin bir etkisi görülmemiştir.

Ses yutumu için keçe, poliüretan, yün tipli malzemeler tercih edilmelidir. Bu tipler arasında yapılacak seçim ise malzemenin kullanılacağı ortam ile alakalıdır. Mineral katkılı yün malzemeler suya dayanıklıyken keçe malzemesi suda kaldığında çözümler göstermektedir ve koku yapmaktadır. Keçe ve yün tipli malzemelerde yanmazlık özelliği bulunmaktadır. Poliüretan malzemesi üretim kolaylığı ve enjeksiyon şeklinde kalıptan çıkarılması gibi özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Mineral katkılı yün malzemeler ve özellikle taş yünü maliyetinin düşüklüğü sebebiyle de tercih edilmektedir. Fakat yün malzemeler insan derisi için kaşındırıcıdır. Ayrıca keçe malzemesinin üretim prosesi diğerlerine göre daha karmaşıktır. Yutulması gereken ses kaynağında oluşturulan sesin frekansı da bu seçimde önemlidir. Örneğin orta seviyeli frekans bandı için ses yutumunun sağlanması isteniyorsa  $100 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğunda poliüretan kullanılması tercih

edilmektedir. Burada genel olarak otomobilde malzemenin kullanılacağı bölgeye, bu bölgedeki ses kaynağının frekansına ve bu tip malzeme özelliklerine göre seçim yapılmalıdır.

Ses iletim kaybında en iyi sonucu veren malzeme 3 mm kalınlığında ve  $2000 \text{ kg/m}^3$  ağırlıklı alana sahip olan ağır katman karışımıdır. Bu malzemenin ses iletim kaybı diğer tüm malzemelerden yüksektir. Burada malzemenin visko elastik yapıda, ağır ve elastisite modülünün yüksek olması malzemeyi ses iletim kaybı açısından ön plana çıkarmaktadır. Ses iletim kaybı malzemenin fiziksel bir özelliği değildir. Malzeme ağırlığının artırılmasıyla ses iletim kaybının artması da ağır yapının titreşim sönümlenme özellikleriyle ilişkilendirilebilir. Ses iletim kaybı eğrisinde bazı frekanslarda oluşan ani azalmaların sebebi malzeme yapısının doğal modlarından kaynaklanmaktadır. Yapının titreşimi, doğal frekanslarda oluşan modları ortaya çıkarmaktadır. Ağır katman ve rijit poliüretan malzemelerinde bu rezonanslar gözlemlenmiştir çünkü bu malzemeler tüp içerisine yerleştirilmesi zor malzemelerdir ve ölçüm esnasında titreşim göstermişlerdir. Rijit yapıdaki malzemeleri yerleştirmek daha zordur ve dolgu macunu uygulamaları bulunmaktadır.

Bu çalışmadaki malzemeler içerisinde ısı iletim katsayısı en düşük olan malzeme cam yünü, en iyi ısı yalıtımını kalınlıktan bağımsız olarak sağlamaktadır. Diğer lifli ve köpük şekilde olan malzemelerin de ısı yalıtımı performansı bulunmaktadır. Ağır katman malzemesi ise ısı yalıtımından söz edilemeyecek kadar yüksek bir ısı iletimine sahiptir.

Bu çalışmanın sonucunda numunelerin akustik ve termal performanslarının kalınlık, ağırlıklı alan, içerik gibi birçok farklı numune özelliğine bağlı olduğu sonucu deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. Elde edilen genel sonuç, malzeme ağırlığının artırılmasıyla akustik yalıtımın ve ısı iletiminin arttığının gözlemlenmesidir. Malzemenin ağırlığı artırıldığında kalınlıktan bağımsız olarak ısı yalıtımı özellikleri kötüleşmektedir.

Araçta ısı ya da ses yalıtımını sağlayacak olan ürünlerde yapılacak olan tasarımlar ve malzeme seçimleri için giriş verisi oluşturacak değerlere ulaşılmıştır. Örneğin, keçe malzemesine ait kalınlığın artışıyla artan ses yalıtımı özellikleri değişken kalınlıkta bir izolatörün tasarımında fikir verici olacaktır. Burada bir fikir yürütülürse, aynı kalınlıktaki

malzemenin ağırlığı arttırıldıkça gözenekliliğinin azalacağı açıktır. Isının daha sık ortamlarda daha yüksek seviyelerde iletileceği de fizik kuralı olarak bilinmektedir. Ayrıca ses yutumu ve iletimi açısından ağırlığın arttırılmasıyla ses iletim kaybının kesin olarak artacağı açıktır fakat ses yutumu hakkında net bir şey söylemek zordur.

Burada malzemelerin diğer tüm özelliklerinin bilinmesi daha fikir verici olacaktır. Malzemenin akustik biot parametrelerinin, termal direnç özelliklerinin bilinmesiyle daha kesin yorumlar yapılabilmektedir. Malzemelerin iç yapısı hakkında fikir sahibi olunmalıdır. Örneğin malzeme kalınlığı arttırıldıkça termal yalıtım özelliği iyileşecektir fakat sadece ısı iletim katsayısı ile bu gözlemlenememektedir. Ayrıca yine de yapılan bu çalışmalar sonucunda malzemelere ait üç farklı değer elde edilmiştir. Bu mühendislik malzemelerine ait sonuçlar hakkında yorumlar yapılarak akustik ve termal yalıtım özellikleri arasında, kalınlığın arttırılmasıyla ses yutum katsayısının ve termal yalıtımın arttığı, ağırlığın arttırılmasıyla ses iletim kaybının arttığı ve ısı iletim katsayısının azaldığı bağlantısı kurulmuştur. Ağırlık artışı ses yalıtımını arttırırken ısı iletimini arttırarak kalınlıktan bağımsız ısı yalıtımını azaltmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen veriler sonlu elemanlar analizleri için de bir giriş verisi oluşturmaktadır. Her disiplinde olduğu gibi akustik ses alanı hesaplamalarında da sonlu elemanlar analizleri tercih edilmeye başlanmıştır. Bu analizleri gerçekleştirebilmek için bir ölçüm eğrisine ve malzemeye ait gözeneklilik, kıvrımlılık, statik hava akış direnci, elastisite modülü, sönüm oranı gibi pek çok değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerlerin çoğu ölçülerek elde edilebilir ya da bu çalışmada ölçülen eğriler kullanılarak tersine mühendislik yaklaşımları ile elde edilmektedirler. Termal analizleri gerçekleştirebilmek için malzemenin çalışma sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayısı bilinmelidir. Sonlu elemanlar analizleri için literatürde yer alacak bu değerlerin giriş verisi olarak kullanılması, bu çalışmanın ileri aşamaları olarak görülebilir.

## KAYNAKLAR

**Abbas, A., Zhao, Y., Zhou, J. 2013.** Improving thermal conductivity of cotton fabrics using composite coatings containing graphene, multiwall carbon nanotube or boron nitride fine particles. *Fibers Polym.*, 14: 1641–1649.

**Ahmed, N.F. 2016.** Effect of Fibers Types on the Properties of Acoustic and Thermal Nonwoven Fabrics Used in Cars. *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, 6(10):9-18.

**Allan, P.S., Ahmadnia, A., Withnall, R., Silver, J. 2012.** Sound transmission testing of polymer compounds. *Polymer Testing*, 31(2):312-321.

**Anonim, 1971.** BS 4745, Method for determination of thermal resistance of textiles. British Standards Institution, UK.

**Anonim, 1990a.** ASTM D 1518-85, Standard test method for thermal transmittance of textile materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.

**Anonim, 1990b.** Instruction manuals of the Alambeta. Permetest instruments. Sensora Liberec Registered, Czech Republic.

**Anonim, 1991a.** ISO 8302: Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus. International Organization for Standardization, Switzerland.

**Anonim, 1991b.** ISO Norm 9053, Acoustics, Materials for acoustical applications - Determination for airflow resistance. International Organization for Standardization, Switzerland.

**Anonim, 1995a.** IEC 61260, Electroacoustics, Octave-band and fractional-octave-band filter. International Electrotechnical Commission, Switzerland.

**Anonim, 1995b.** ISO Norm 10845, Acoustics, Frequency weighting A for noise measurements. International Organization for Standardization, Switzerland.

**Anonim, 1998a.** ISO Norm 10534-2, Acoustics, Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes: Part 2: Transfer-function method. International Organization for Standardization, Switzerland.

**Anonim, 1998b.** ISO Norm 14938, Acoustics, Revision of B- and C-weightings and Lin-response for noise measurements. International Organization for Standardization, Switzerland.

**Anonim, 2002.** IEC Standard 61672, Electroacoustics, Sound level meters. International Electrotechnical Commission, Switzerland.

**Anonim, 2013a.** ASTM E1225-13, Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique. ASTM International, West Conshohocken, PA.

**Anonim, 2013b.** PACS 2010 Regular Edition – Acoustics Appendix. Acoustical Society of America, USA.

**Anonim, 2014.** Product Data Sound Calibrator Type 4231. Brüel&Brüel&Kjær, Naerum, Denmark.

**Anonim, 2015a.** HT-350, Termal iletkenlik eğitim seti deney föyü. Deneysan Eğitim Cihazları, Balıkesir.

**Anonim, 2015b.** ISO 22007-2:2015 Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity — Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method. International Organization for Standardization, Switzerland.

**Anonim, 2017.** ASTM C335 / C335M-17, Standard Test Method for Steady-State Heat Transfer Properties of Pipe Insulation. ASTM International, West Conshohocken, PA.

**Anonim, 2019a.** ASTM E1530-19, Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission by the Guarded Heat Flow Meter Technique. ASTM International, West Conshohocken, PA.

**Anonim, 2019b.** ASTM E2611-19, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method. ASTM International, West Conshohocken, PA.

**Anonim, 2019c.** Microphone Guide: Free-field, Pressure or Random incidence. GRAS Sound & Vibration A/S. <https://www.gras.dk/microphone-guide/free-field> (Erişim tarihi: 27.09.2019)

**Anonim, 2019d.** Product Data: Impedance Tube Kit (50 Hz – 6.4 kHz) Type 4206, Impedance Tube Kit (100 Hz – 3.2 kHz) Type 4206-A, Transmission Loss Tube Kit (50 Hz – 6.4 kHz) Type 4206-T. Brüel&Kjær, Naerum, Denmark.

**Arambakam, R., Tafreshi, H., Pourdeyhimi B., 2013.** A simple simulation method for designing fibrous insulation materials. *Mater Design*, 44: 99–106.

**Aydın, İ. 2008.** Otomobillerde Kullanılan İzolasyon Malzemelerinin Yutum Katsayılarının Ölçülmesi ve Uygun Malzeme Kalınlığının Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, GÜ, Ankara.

**Aydın, İ., Batmaz, İ. 2012.** Determination of The Sound Absorption Coefficients of Insulation Materials Used on Vehicles. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(4): 687–693.

- Bandyopadhyay, S.K., Ghose, P.K., Bose, S.K., Mukhopadhyay, U. 1987.** The Thermal Resistance of Jute and Jute-blend Fabrics. *The Journal of The Textile Institute*, 78(4): 255-260.
- Behera, B.K., Mishra, R. 2007.** Artificial neural networkbased prediction of aesthetic and functional properties of worsted suiting fabrics. *Int. J. Cloth. Sci. Tech.*, 19:259–276.
- Beranek, L. L. 1986.** Acoustics. American Institute of Physics Inc., New York, USA, pp: 9-12.
- Buck, W., Rudtch, S. 2006.** Thermal Properties Springer Handbook of Materials Measurement Methods. H. Czichos, T. Saito, and L. Smith, Editors. Springer Berlin Heidelberg. p. 399-429.
- Burnett, D.S. 1994.** A three-dimensional acoustic infinite element based on a prolate spheroidal multipole expansion. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96:2798-2816.
- Burnett, D.S., Holford, R.L. 1998.** An ellipsoidal acoustic infinite element. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 164:49-76.
- Carley, M. 2001.** Some notes on acoustics: Sound in time and space. <https://people.bath.ac.uk/ensmjc/Notes/acoustics.pdf> (Erişim tarihi: 15.09.2019)
- Champoux Y., Stinson M.R., Daigle G.A. 1991.** Air-based system for the measurement of porosity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 89(2):910-916.
- Chen, Y., Sun, L., Cjiparus, O., Negulescu, I., Yachmenev, V., Warnock, M. 2005.** Kenaf/Ramie Composite for Automotive Headliner. *Journal of Polymers and the Environment*, 13(2):107-114.
- Claucherty, S., Sakaue, H. 2018.** Phenol-Formaldehyde Resin for Optical-Chemical Temperature Sensing Steven. *Sensors*, 18(6): 1756-1765.
- Cox, T.J., D’Antonio, P. 2004.** Acoustic Absorbers and Diffusers. Spon Press, New Fetter Lane, London, UK, 405pp.
- Crocker, M. Sommerfeldt, S. 2008.** Handbook of Noise and Vibration Control. The Journal of the Acoustical Society of America. 1898 pp.
- Çengel, Y.A. 2002.** Heat Transfer: A Practical Approach. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, USA.
- Degiovanni, A. 1994.** Thermal conductivity and diffusivity of solids. *L’expertise technique et scientifique*, R:2850.
- Dhatt, G., Touzot, G. 1984.** The Finite Element Method Displayed, John Wiley & Sons. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 65(7):326-326.



**Eyüpoğlu, S., Dayıoğlu, H., Merdan, N., Kılınc, M. 2018.** The Investigation of Air, Heat And Sound Permeability Of Perlite Coated Nonwoven Fabrics With Different Weights. *The Online Journal of Science and Technology*, 8(2):124-128.

**Ettah, E.B., Egbe, J.G., Takim, S.A., Akpan, U.P., Oyom, E.B. 2016.** Investigation of the Thermal Conductivity of Polyvinyl Chloride (Pvc) Ceiling Material Produced In Epz Calabar, For Application Tropical Climate Zones. *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering (IOSR-JPTE)*, 3(2): 34-38.

**Ezbakhe, H. 1986.** Thermal and mechanical characterization of porous materials used as simple or carrier insulators. *Ph.D. Thesis*, UCPB Lyon. France.

**Fahy, F. J. 1989.** Sound intensity. Elsevier Applied Science, London, 4-9 pp.

**Fourier, J.B. 1822.** Theorie Analytique de la Chaleur Paris. Ed: Freeman, A., Dover Publications, New York, USA.

**Gelen, M. 2016.** Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Akustik Malzemeler ve Malzeme Özelliklerinin Akustik Parametrelere Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı, İstanbul.

**Hansen, C. 1951.** Fundamentals of acoustics. University of Adelaide, Department of Mechanical Engineering, South Australia, pp 5.

**Hes, L., Ivan, D. 1989.** New method and equipment for measuring thermal properties of textiles. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 42:124-128.

**Heutschi, K. 2016.** Lecture Notes on Acoustics I. Institute for Signal- and Informationprocessing. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 157 pp.

**Ingard, K. U., Dear, T. A. 2005.** Measurement of Acoustic Flow Resistance. *Journal of Sound and Vibration*, London, 567-572.

**Johnson D.L., Koplik J., Dashen R. 1987.** Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.*, 176:379-402.

**Kakaç, S. 1998.** Isı Transferine Giriş I: Isı İletimi. Tıp&Teknik yayıncılık, Ankara, Türkiye, 315 s.

**Kılıç, M., Yiğit, A. 2000.** Isı Transferi. Aktüel Yayınları Alfa Akademi yayınevi, Bursa, Türkiye, 507 s.

**Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V. 1982.** Fundamentals of Acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, USA, 569 pp.

- Kino, N., Ueno, T. 2007.** Investigation of. Sample Size Effects in Impedance Tube Measurements. *Applied Acoustics*, 68:1485-1493.
- Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., Hroudová, J. 2011.** Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9):2518- 2523.
- Kundt, A. 1866.** Acoustic Experiment. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 35(4):41–48.
- Lafarge, D., Lemarinier, P., Allard, J.F., Tarnow, V. 1997.** Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 102(4):1995-2006.
- Lee, B., Liu, J.Z., Sun, B., Shen, C.Y., Dai, G.C. 2008.** Thermally conductive and electrically insulating EVA composite encapsulants for solar photovoltaic (PV) cell. *Express Polymer Letters*, 2(5): 357–363.
- Lee, H., Neville, K. 1982.** Handbook of Epoxy Resins. McGraw Hill: New York, NY, USA, pp. 14–24.
- Lienhard, J.H. 1930.** A heat transfer textbook / John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V 3rd ed. C2008. Phlogiston Press, Cambridge, MA, pp 13.
- Maglic D.K., Cezairliyan, A., Peletsky, V.E. 1984.** Survey of Measurement Techniques, Vol. 1 aus der Reihe: Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods. Plenum Press, New York and London, 1121 pp.
- Mahanta, N.K., Abramson, A.R. 2010.** The dual-mode heat flow meter technique: A versatile method for characterizing thermal conductivity. *Int. Jou. of Heat and Mass Transfer*, 53(24): 5581-5586.
- Mani, N. 1971.** Precise determination of the thermal conductivity of fluids using absolute transient hot-wire technique. *Ph.D. Thesis*, University of Calgary. Calgary, Alberta, Canada.
- Morse, P.M., Ingard, K.U. 1986.** Theoretical Acoustics International series in pure and applied physics. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 927 pp.
- Na, Y., Lancaster, J., Casali, J., 2007.** Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Text. Res. J.*, 77:330–335.
- Özişik, M.N. 1993.** Heat Conduction: Second Edition. A Wiley Interscience Publication, New York, USA, 689 pp.
- Pittman, J.F.T. 1968.** Fluid thermal conductivity determination by the transient line source method. *Ph.D. Thesis*, University of London, London, UK.

- Rosen, S., Howell, P. 2011.** Signals Through Systems: Signals and Systems for Speech and Hearing. Emerald Publishing, United Kingdom, 163 pp.
- Savija, I., Culham, J. R., Yovanovich, M. M., Marotta, E. E. 2003.** Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 17:43–52.
- Shete, K. 2015.** Influence of Automotive Air Conditioning Load on Fuel Economy of IC Engine Vehicles. *Int. Jou. of Scientific & Engineering Research*, 6(8): 1367-1372.
- Shu, Y., Weidong, Y., Pan N. 2011.** Investigation of the sound-absorbing behavior of fiber assemblies. *Text. Res. J.*, 81:673–682.
- Taban, E., Khavanin, A., Jafari, A.J., Faridan, M., Tabrizi, A.K. 2019.** Experimental and mathematical survey of sound absorption performance of date palm fibers. *Heliyon*, 5(6): 1-8.
- Thilagavathi, G., Pradep, E., Kannaian, T., Sasikala, L. 2010.** Development of Natural Fiber Nonwovens for Application as Car Interiors for Noise Control. *Journal of Industrial Textiles*, 39(3):263-277.
- Vosteen, H.D., Schellschmidt, R. 2003.** Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28: 499-509.
- Voumbo, L.M., Dieng, B., Tamba, S., Gaye, S., Sisokko, G., Adj, M. 2007.** Automation of the measurement of thermal conductivity and diffusivity through the box method. *Jou. Des Sci.*, 7:82-95.
- Wang, C.N., Torng, J.H. 2001.** Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials. *Applied Acoustics*, 62:447-459.
- Wubbe, E. 2003.** Reaping resins from the Earth: Cargill Dow develops a fiber using corn. *Nonwovens Industry*, 34(3):30.
- Yang, T., Xiaoman, X., Mishra, R., Novak, J., Militky, J. 2016.** Acoustic evaluation of Struto nonwovens and their relationship with thermal properties. *Textile Research Journal*, 88(4): 426–437.
- Yeşilata, B., Turgut, P., Işiker, Y. 2007.** Kompozit Yapı Malzemelerinde Isıl Özellik Ölçümü-1: Mevcut Ölçüm Tekniklerin İrdelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 564: 2-9.
- Yılmaz, N.D. 2009.** Acoustic Properties of Biodegradable Nonwovens. *PhD Thesis*, NC State University, USA.

**Yu, Z.T., Xu, X., Fan, L., Hu, Y.C., Cen, K.F. 2011.** Experimental Measurements of Thermal Conductivity of Wood Species in China: Effects of Density, Temperature, and Moisture Content. *Forest Products Journal*, 61: 130-135.

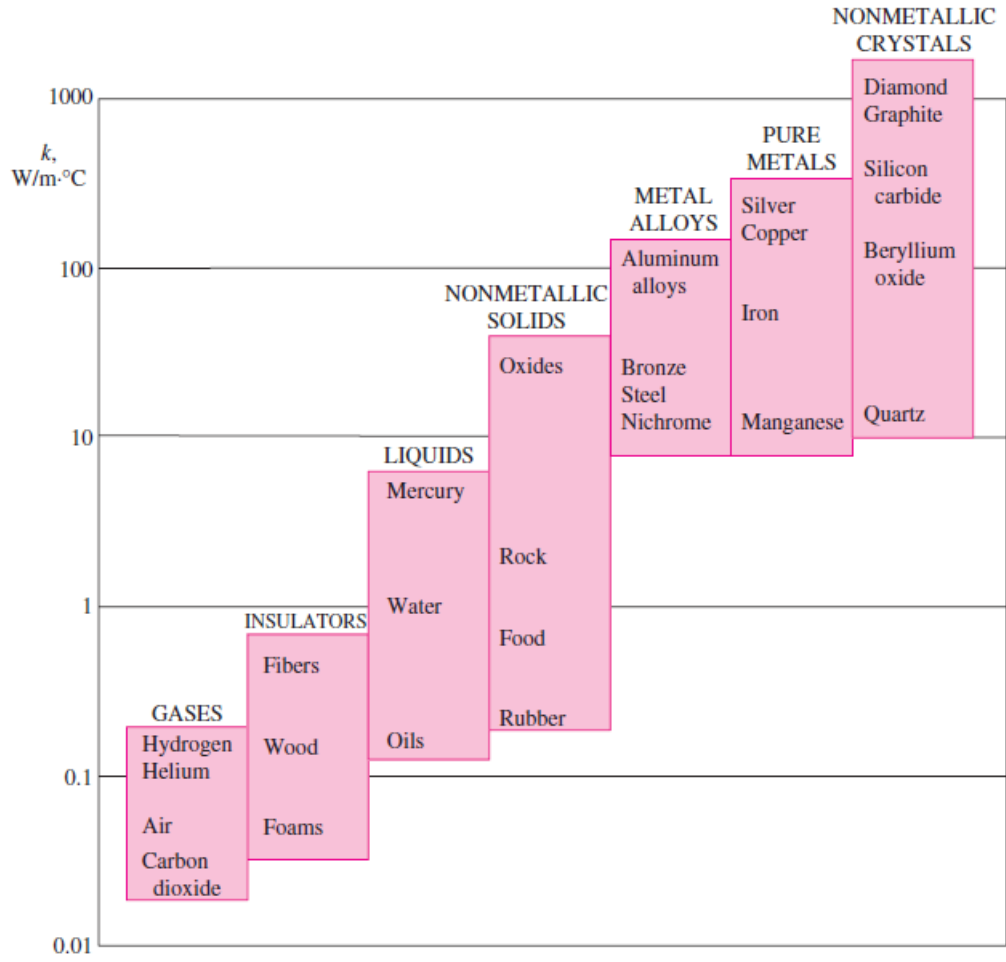
**Zent, A., John, T.L. 2007.** Automotive sound absorbing material survey results. Society of Automotive Engineering: Noise and Vibration Conference and Exhibition, May 14-17, Illinois, USA.

**Zhu, W., Nandikolla, V., George, B. 2015.** Effect of Bulk Density on the Acoustic Performance of Thermally Bonded Nonwovens. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 10(3):39-45.

## **EKLER**

- EK 1** Farklı Malzemelere Ait Isı İletim Katsayıları (Çengel 2002)
- EK 2** Çalışmadaki Bazı Malzemelere Ait Isı İletim Katsayıları (Kılıç ve Yiğit 2000, Lee ve ark. 2008, Ettah ve ark. 2016, Lee ve Neville 1982, Claucherty ve Sakaue 2018, Bandyopadhyay ve ark. 1987, Abbas ve ark. 2013)
- EK 3** Sıklıkla Kullanılan Bazı Malzemelerin Ses Yutum Katsayıları (Crocker ve ark. 2007)

## EK 1 Farklı Malzemelere Ait Isı İletim Katsayıları (Çengel 2002)



**EK 2 Çalışmadaki Bazı Malzemelere Ait Isı İletim Katsayıları (Kılıç ve Yiğit 2000, Lee ve ark. 2008, Ettah ve ark. 2016, Lee ve Neville 1982, Claucherty ve Sakaue 2018, Bandyopadhyay ve ark. 1987, Abbas ve ark. 2013)**

<b>Malzeme Türü</b>	<b>Isı İletim Katsayısı (W/mK)</b>	<b>Kaynak</b>
PES	0,14	(Kılıç ve Yiğit 2000)
PP	0,12	
Taş Yünü	0,043	
Cam Yünü	0,04	
Poliüretan	0,035	
EVA	0,23	(Lee ve ark. 2008)
PVC	0,17	(Ettah ve ark. 2016)
Epoksi Reçine	0,20	(Lee ve Neville 1982)
Fenolik Reçine	0,16	(Claucherty ve Sakaue 2018)
Jute	0,427	(Bandyopadhyay ve ark. 1987)
Yün (Koton)	0,030	(Abbas ve ark. 2013)

**EK 3 Sıklıkla Kullanılan Bazı Malzemelerin Ses Yutum Katsayıları (Crocker ve ark. 2007)**

Malzemeler		Frekans (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Cam Elyaf (64 kg/m <sup>3</sup> )	25 mm	0,07	0,23	0,48	0,83	0,88	0,8
	50 mm	0,2	0,55	0,89	0,97	0,83	0,79
	100 mm	0,39	0,91	0,99	0,97	0,94	0,89
Poliüretan	6 mm	0,05	0,07	0,1	0,2	0,45	0,81
Köpük (Açık Hücre)	12 mm	0,05	0,12	0,25	0,57	0,89	0,98
	25 mm	0,14	0,3	0,63	0,91	0,98	0,91
	50 mm	0,35	0,51	0,82	0,98	0,97	0,95
Saç Keçe	12 mm	0,05	0,07	0,29	0,63	0,83	0,87
	25 mm	0,06	0,31	0,8	0,88	0,87	0,87
Sırsız Tuğla		0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
Boyalı Tuğla		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Beton blok		0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,03
Beton		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Tahta		0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Cam		0,35	0,25	0,18	0,12	0,08	0,04
Alçıtaşı		0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Kontrollak 10 mm		0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11
Soundblox beton	Type A	0,62	0,84	0,36	0,43	0,27	0,5
	Type B	0,31	0,97	0,56	0,47	0,51	0,53
Akustik Spreyli Alçıtaşı		0,15	0,47	0,88	0,92	0,87	0,88
Akustik Alçı		0,25	0,45	0,78	0,92	0,89	0,87
Beton Üzeri Halı		0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,66
Kauçuk Üzeri Halı		0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Sert Yüzeyler		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Halı 5 mm		0,02	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5
Hafif Titreşen Yüzeyler		0,1	0,07	0,05	0,04	0,04	0,05
Peluş perde, 450Ns/m,		0,15	0,45	0,9	0,92	0,92	0,95
Poliüretan köpük 15mm		0,08	0,22	0,55	0,7	0,85	0,75
Taş yünü 30 mm		0,08	0,42	0,82	0,85	0,9	0,88
Koltuk Döşemesi		0,5	0,7	0,85	0,95	0,95	0,9



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tunahan Doğru  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 08.03.1995  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Ahmet Vefik Paşa Anadolu Lisesi  
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Erkurt Arge A.Ş

İletişim (e-posta) : tunahan.dogru@erkurtarge.com.tr