

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AKUSTİK MALZEMELER
VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN AKUSTİK PARAMETRELERE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa GELEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AKUSTİK MALZEMELER
VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN AKUSTİK PARAMETRELERE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa GELEN
(503111212)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111212 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa GELEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AKUSTİK MALZEMELER VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN AKUSTİK PARAMETRELERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cüneyt FETVACI
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **28 Kasım 2016**
Savunma Tarihi : **30 Aralık 2016**

Sevgili Eşime ve Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez hazırlık sürecimde değerli fikirlerini benimle paylaşarak yol gösteren ve desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ'e çok teşekkür ederim.

Aralık 2016

Mustafa Gelen
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL SES KAVRAMLARI.....	3
2.1 Ses ve Gürültü	3
2.3 Ses Dalgaları	4
2.4 Ses Basıncı	5
2.5 Ses Yüksekliği.....	5
2.6 Akustik Empedans.....	6
2.7 Oktav Bantları	6
2.8 Ses Yutum Katsayısı	6
2.9 Ses İletim Kaybı	7
2.10 Hız	7
3. AKUSTİK PARAMETRE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	9
3.1 Empedans Tüp.....	9
3.2 Ses İletim Kaybı Ölçümleri.....	11
3.3 Çınlanım Odaları	11
3.4 Alfa Kabin	12
4. ARAÇ NVH ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER.....	15
4.1 NVH Tanımı ve Otomotiv Endüstrisindeki Önemi.....	15
4.2 Araç Kabin İçi Ses İletimi	15
4.2.1 Yapısal yolla ses iletimi	16
4.2.2 Hava yoluyla ses iletimi	17
4.3 Araç Ses ve Titreşim Kaynakları.....	18
4.3.1 Motor ve güç aktarma organları	19
4.3.2 Süspansiyon sistemi	20
4.3.3 Lastikler	20
4.3.4 Aerodinamik kaynaklar	20
4.3.5 Gıcırta ve tıkırtı ses kaynakları	21
4.3.6 Diğer ses kaynakları	21
4.4 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Akustik Malzemeler.....	22
5. AKUSTİK PERFORMANSI ETKİLEYEN MALZEME ÖZELLİKLERİ ..	29
5.1 Gözeneklilik	30
5.2 Gözenek Hücre Yapısı	31
5.3 Yoğunluk	32

5.4 Hava Akış Direnci	34
5.5 İç Yapı Dağılıklığı	35
5.6 Kalınlık	35
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	39
6.1 Çalışmanın Kapsamı.....	39
6.2 Test Düzeneginin Tanıtılması.....	39
6.3 Numunelerin Tanıtılması.....	42
6.4 Alfa Kabin Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	42
7. GENEL DEĞERLENDİRME.....	55
KAYNAKLAR.....	57

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
ISO	: International Organization for Standardization
PVB	: Polivinil Bütral
PET	: Polietilen Teraflat
PP	: Polipropilen
PU	: Poliüretan

SEMBOLLER

f_0	: Merkez Frekansı, Hz
f_1	: Frekans Alt Sınır Değeri, Hz
f_2	: Frekans Üst Sınır Değeri, Hz
E_a	: Yutulan Ses Enerjisi, J
E_i	: Gelen Ses Enerjisi, J
b_w	: Frekans Bant Genişliği, Hz
α	: Ses Yutum Katsayısı
TL	: Ses İletim Kaybı, dB
W_1	: Malzemenin üzerine gelen toplam ses enerjisi, J
W_2	: İletilen ses enerjisi, J
T	: Periyot, s
c	: Ses hızı, m/s
f	: Ses frekansı, Hz
λ	: Dalga boyu, m
S	: Malzemenin ses yutumu, sabin
T_0	: Malzemededen önceki çınlanım süresi, s
T_1	: Malzemededen sonraki çınlanım süresi, s
V	: Çınlanım odasının hacmi, m ³
H	: Gözeneklilik oranı
V_a	: Toplam gözenek hacmi, m ³
V_m	: Yutum malzemesinin toplam hacmi, m ³
A_s	: Numunenin yüzey alanı, m ²

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Akustik Parametrelere Etkiyen Malzeme Özellikleri.....	29
Çizelge 6.1 : Alfa kabin teknik özellikler.....	41
Çizelge 6.2 : Alfa kabin ölçüm numuneleri ve malzeme özellikleri	42
Çizelge 6.3 : Poliüretan (PU) sünger alfa kabin ölçüm sonuçları.....	43
Çizelge 6.4 : Polipropilen (PP) köpük alfa kabin ölçüm sonuçları	45
Çizelge 6.5 : Koton keçe alfa kabin ölçüm sonuçları	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İşitme sınır eğrisi	3
Şekil 2.2 : Ses Dalgası [1].....	4
Şekil 3.1 : Empedans tüp ölçüm yöntemi test düzeneği [2].	9
Şekil 3.2 : Empedans tüp ölçüm yöntemi [2].	10
Şekil 3.3 : Ses iletim kaybı ölçümü [2].	11
Şekil 3.4 : Alfa kabin	12
Şekil 3.5 : Alfa kabin testinde ses yutum katsayısı ölçümleri	13
Şekil 4.1 : Kaynak ve alıcı arası etkileşim.....	16
Şekil 4.2 : Araç ses ve titreşim kaynağı frekans analizi	16
Şekil 4.3 : Ses ve titreşim iletim yoluyla taşınım	17
Şekil 4.4 : Ses ve titreşim hava yolu ile taşınımı.....	18
Şekil 4.5 : Araç akustiği ses ve titreşim kaynakları.....	18
Şekil 4.6 : Araç ses ve titreşim kaynakları	19
Şekil 4.7 : Araç ses ve titreşim kaynağı frekans analizi	19
Şekil 4.8 : Siler malzemeli ve siler malzemesiz ses iletimi [5]	21
Şekil 4.9 : Koton keçe akustik malzeme örneği	22
Şekil 4.10 : Ön göğüs ses izolasyonu uygulama örneği	23
Şekil 4.11 : PET mikrofiber akustik malzeme örneği.....	23
Şekil 4.12 : Trim döşemesi PET mikrofiber uygulama örneği.....	24
Şekil 4.13 : PET mikrofiber davlumbaz altı uygulama örneği	24
Şekil 4.14 : Pet mikrofiber kaput altı uygulama örneği.....	24
Şekil 4.15 : Püskürtmeli pvc uygulaması [4].....	25
Şekil 4.16 : Araç gövdesi üzerindeki titreşim sönümleme elemanları	25
Şekil 4.17 : Titreşim sönümlemeyici sandviç yapı örneği [4].....	26
Şekil 4.18 : Polivinil bütral (PVB) uygulaması	26
Şekil 4.19 : Poliüretan sert köpük ile Acoustiflex malzeme yapısı [9]	27
Şekil 4.20 : Acoustiflex ve polüretan köpüklerin morfolojik özellikleri [9]	28
Şekil 5.1 : Gözeneklilik ile ses sönüm katsayısı değişimi [8]	30
Şekil 5.2 : Yoğunluk ile ses sönüm katsayısı değişimi [8].....	33
Şekil 5.3 : Hava akış direnci ile ses sönüm katsayısı değişimi [8].....	34
Şekil 5.4 : Kalınlık ile sönüm katsayısı değişimi [8].....	35
Şekil 5.5 : Hava akış direncinin sönüm katsayısı üzerine etkisi [7]	36
Şekil 5.6 : Hava akış direnci ve kalınlığın sönüm katsayısı üzerine etkisi [7]	36
Şekil 5.7 : Hava akış direncinin sönüm katsayısına etkisi [7]	37
Şekil 6.1 : Alfa kabin	40
Şekil 6.2 : Alfa kabin test çerçevesi.....	40
Şekil 6.3 : Alfa kabin mikrofon düzeneği.....	41
Şekil 6.4 : Poliüretan sünger ses sönüm katsayısı – kalınlık değişimi	43

Şekil 6.5 : Poliüretan (PU) malzemenin kalınlığına bağlı olarak yutum katsayısı ve maliyet arasındaki ilişki	44
Şekil 6.6 : Polipropilen ses sönüm katsayısı – kalınlık değişimi	45
Şekil 6.7 : Polipropilen (PP) köpük malzemenin kalınlığına bağlı olarak yutum katsayısı ve maliyet arasındaki ilişki.....	46
Şekil 6.8 : Koton keçe ses sönüm katsayısı – kalınlık değişimi	47
Şekil 6.9 : Koton keçe malzemenin kalınlığına bağlı olarak yutum katsayısı ve maliyet arasındaki ilişki	48
Şekil 6.10 : 10 mm kalınlık / ses sönüm katsayısı – yoğunluk değişimi	49
Şekil 6.11 : 15 mm kalınlık / ses sönüm katsayısı – yoğunluk değişimi	50
Şekil 6.12 : 20 mm kalınlık / ses sönüm katsayısı – yoğunluk değişimi	51
Şekil 6.13 : Tüm numunelerin sönüm katsayısı karşılaştırma tablosu	52
Şekil 6.14 : Araç taban halısı malzeme örneği (ABS+Koton keçe)	52
Şekil 6.15 : Taban halısı ABS ve keçe tarafı alfa kabin ölçüm sonuçları.....	53

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AKUSTİK MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE AKUSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv endüstrisinde araç sürüş konforu önemli hale gelmiş ve müşterilerin beklentileri de buna bağlı olarak artmıştır. Bu da tüm bu beklentileri karşılayabilmek için otomotiv üreticileri müşteri beklentilerinden taviz vermeden pazardaki zorlu rekabet şartlarında ayakta kalabilmek ve maliyetleri minimize edebilmek için araçlarda kullanılan tüm malzemelerin özelliklerinin çok iyi bilinmesine ve problemlere karşı optimum çözüm sağlayabilecek malzemelerinin araştırılmasını ve geliştirilmesini beraberinde getirmektedir.

Üretilmesi planlanan otomobilin bilgisayar ortamındaki dizayn, prototip ve proje fazlarında aracın akustik performansı önemli derecede takip edilmekte ve optimum dizayn için farklı malzeme örnekleri kullanılarak geliştirmelere yapılmaktadır. Bu testler aracın dizayn aşamasında bilgisayar destekli analiz programlarıyla yapıldığı gibi proje fazlarında ise ilk yatırım maliyeti çok yüksek olan rüzgar tüneli testlerinde araç üzerinden objektif veri elde edilmesi yoluyla ve yetişmiş test operatörleri yardımıyla subjektif olarak aracın belirli yol ve test şartlarında değerlendirilsi ile yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı otomobillerde sürücü ve yolcuların şikayet etmelerine sebep olan akustik kaynakların tanıtılması, araç üzerinde Akustik malzeme uygulanan parçaların tanıtılarak uygulama yöntemlerinin incelenmesi, akustik malzemelerin özelliklerinin ve malzeme özelliklerinin akustik parametrelere etkisinin incelenmesi, akustik parametre ölçüm metodlarının incelenmesi ve son olarak farklı numuneler üzerinden akustik parametre ölçüm metodlarından biri olan alfa kabin testinde farklı malzeme özelliklerinde akustik sönüm kabiliyetinin incelenmesidir.

ACOUSTIC PROPERTIES AND INVESTIGATION OF ACOUSTIC MATERIALS USED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

SUMMARY

Today's NVH properties in automotive industry become incrementally the most important factor on customer satisfaction. That makes automobile manufacturers investigate all types of acoustic materials and their properties to be able to take place in automotive market.

NVH term is abbreviation of key elements of vehicle driving comfort wording Noise, Vibration and Harshness. Noise is shortly what the customer hears. It is characterized by frequency (20- 20 kHz) and its level is defined by dB. It can be desirable like powerful sounding engine or fine tuned exhaust or undesirable like road NVH. Vibration is what the customer feels and sees. Motion which is sensed by the human body mainly in 0.5 Hz – 50 Hz range and it is characterized by frequency, level and direction. Harshness is combined effects of noise and vibration. It means rough, grating and discordant sensation.

This project aims are providing information about noise and vibration sources at automobiles which make the customer dissatisfaction, introduction to acoustic materials used on automobiles and their assembly strategies, providing information about the acoustic materials properties and effects on acoustic parameters, at the end of the project, investigation of the material properties effects on acoustic parameters by using alpha cabin. Sound absorption materials are also used for thermal resistancy, fuel consumption improvements. In this study different types and sizes of materials like polyurethane foam, polypropylene foam and shoddy will be compared in terms of noise absorption capacity and also material cost. At the end of the study a car floor mat will be measured in alpha cabin and shoddy versus ABS material sound absorption skills will be compared.

Vehicle noise and vibration performance has a big affect on drive comfort and travel comfort. Vehicle vibration and noise which emerge depending on the different parameters can be optimize regarding to provide a comfortable drive.

During design, prototype and launch periods vehicle NVH is always has a big effect on launch period milestones and vehicle engineering teams of big car manufacturer work on alternative materials to get the optimum design of the vehicle NVH properties. Objective and subjective evaluations show the vehicle NVH properties. During design phase teams are working on CAE tools, at prototype phase vehicles are tested in 'Wind Tunnel' and subjective evaluations by trained auditors on test tracks.

Automotive and absorption material manufacturers are taking big efforts on improving materials which have better absorption capacity. There are various of testing systems to verify the absorption capacity, these are reverberation room, impedance tube and alpha cabin measurements. Reverberation room consists of 200 m³ with reflective walls to maintain a diffuse sound field. It is defined in ASTM C-423, EN 20354 standards. In impedance tube method the components are analyzed by the two microphones. Normal incidence noise which enters the material at 90° is used. Useful for comparing acoustic absorbers. It is defined in ASTM E 1050 standard. Alpha cabins are small reverberation rooms which were designed for

automotive industry and they have 6.44 m^3 standard volume to support 400 Hz center frequency. It has no standard yet.

In this study noise sources during vehicle driving will be analyzed and defined. There are different types of error states which makes the customer dissatisfaction. These are aerodynamic noises, road noises, HVAC noises, powertrain noises and road noise. The biggest sound source of the vehicle is engine. The engine plays a very important role for internal noise of vehicles. Internal combustion engines are generally strong sources of noise and vibration, whereas electric engines are often much quieter. The vibrations from the engine are mainly generated by the reciprocating and rotational masses such as pistons, connecting rods and shafts; for this reason balancing of these masses is very important. There are many sources of noise in a vehicle: in the past the engine was the most important, and the first NVH studies were applied to reduce noise and vibrations generated by the engine and powertrain. As a result current engines and powertrain systems show a strongly reduced level of noise, and consequently other sources of noise such as road noise become very significant. Moreover, the increase of the speed of vehicles has strongly increased the importance of aerodynamic. Description of the main noise sources in vehicles. Diesel engine has much more noise than the petrol engine. The engine noise is being transferred by vehicle body path into the vehicle interior cabin. Engine mounts are designed with dampers to eliminate high impact of the noise and vibration. This noise and vibration transfer path is called structure-borne noise path. Also noise is transferred into the vehicle cabin by the gaps which is created by the poor absorption strategy. This noise path is called airborne noise path. Controlling airborne noise is done by using sound barriers and sound absorbers. Sound barriers working strategy is reducing transmission of sound energy by reflecting it back to its source. examples of sound barriers are lead, EVA and polymeric films.

There are lots of sound absorption materials to eliminate different types of noises. Absorbers dissipates sound energy through internal friction within a porous medium into heat energy. Absorption materials examples are non-wovens, foam, shoddy and fiberglass. Controlling structure borne is done by isolators and dampers. Isolators works for reducing transmission of vibration energy between structural elements. Examples of isolators are rubber or liquid-filled pads for engine mounts. Dampers is used for to attach to panels to reduce vibration. Dissipating vibration energy to utilizing viscous-elastic properties of the damper. Examples of dampers are asphalt and damping foils. During low speed drives tyre noise is the most herable noise, when the engine load increases then the engine- powertrain noises becomes more herable. During the high speed drives flow-acoustic aerodynamic noises becomes more herable.

Acoustic PVB coated windshield is used For eliminating aerodynamic road and wind noise issues during high speed drives. There is a PVB (Polyvinilbutral) layer implemented by pressure and temperature effect between inner and outer windshield. Also for the structure-borne noise refinement additional PVC and deadener pad application is being implemented on vehicle body to eliminate the noise and vibration transfer from vehicle body. Other sound absorption materials used on the vehicle body are shoddy for dash panel and floor mat isolator, PET material usage under the trim parts and under the wheelArches to eliminate tyre road noise.

Material properties has big affect on sound absorption capacity. These properties are density, air flow resistance, thickness, porosity and porosity open/closed cell types

are the most important material specifications. In this study these main material properties sound absorption capacity will be compared in alpha cabin.

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ve rekabet ortamıyla birlikte araç sürücülerin araçlarından ergonomi, güvenlik, yakıt tüketimi, sürüş konforu, ses ve titreşim (NVH) açısından beklentileri her geçen gün artmakta ve otomotiv pazarındaki tüm büyük otomotiv üreticileri araç mühendisliği ekipleri ile bu konuda ciddi zaman ve kaynak yatırımı yaparak müşteri beklentilerine uygun araçlar üretmeye çalışmaktadırlar.

Sürüş konforu açısından büyük bir öneme sahip olan aracın ses ve titreşim özellikleri aracın motor ve diğer aktarma organları kaynaklı, rüzgar sesi, yol sesi ve gıcırta – tıkrta şeklinde olabilmekte ve iletim veya hava yoluyla kabin içerisine iletilmektedir.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemeler ve uygulama alanları, akustik özelliklere etki eden malzeme özellikleri ve bu özelliklerin ürün geliştirme çalışmaları kapsamında test metodlarının incelemesi yapılacaktır. Çalışmanın son kısmında ise alfa kabin kullanılarak çeşitli malzeme örneklerinin farklı koşullarda test edilerek malzeme özelliklerinin akustik performansa etkileri incelenecektir.

2. TEMEL SES KAVRAMLARI

2.1 Ses ve Gürültü

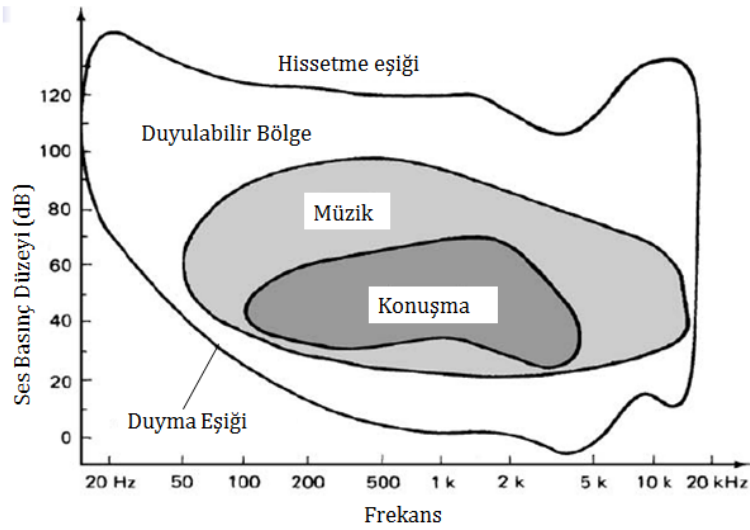
Ses, insanlar tarafından farkedilebilir basınç değişimi olarak adlandırılabilir. Ses frekansı Hertz (Hz) ise bu basınç değişimlerinin birim zamana (saniye) bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Burada Hertz (Hz) = sayk/saniye olarak ifade edilebilmektedir.

Gürültü ifadesi sese göre daha subjektif bir değerlendirme içermektedir. Dinleyici tarafından hoş gitmeyen, rahatsız edici sesleri belirtmek için kullanılmaktadır.

Ses daha çok dinleyicilerin işitme duyusu ile farkedilebilen enerji çeşidini, titreşim ise dokunma ile belirlenen ve işitilemeyen akustik olayları belirtir. [1]

2.2 Desibel

Ses basıncı matematiksel olarak Pa (N/m^2) olarak ifade edilmektedir. İnsan kulağı 2×10^{-5} Pa ile 20 Pa'a kadar olan sesleri işitebilmektedir. Şekil 2.1'de işitme sınır eğrileri görölmektedir. Bu bandın çok geniş olması sebebiyle ses, desibel (dB) olarak adlandırılan bir logaritmik bir ifade ile değerlendirilir. Bir büyüklüğün bir referans değerine bölümü algoritmasına Graham Bell'den yola çıkılarak (Bell) denmektedir. Bu değerin 10'da 1'ine desibel (dB) denmektedir.

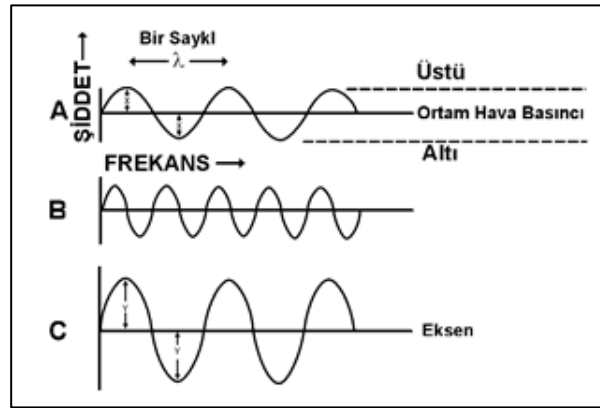


Şekil 2.1 : İşitme sınır eğrisi

2.3 Ses Dalgaları

Ses dalgası hava, su ve katı ortamlar gibi kütle ve elastiklik nitelikleri bulunan ortamlarda yayılmaktadır. Yayıldığı ortamın cinsine göre ses dalgasının yayılma hızı farklı olacaktır. Örnek olarak sesin havada yayılma hızı 331 m/s iken su da 1500 m/s, çelikte ise 6000 m/s hızına kadar olabilmektedir.

Bir ses dalgası başka bir ses dalgasının üç katı frekansa ve üçte bir genliğe sahip olabilir. Ancak her iki dalga herhangi bir zaman kendilerine ait sıfır konumundan geçerse bunlar aynı fazda olarak nitelenir.



Şekil 2.2 : Ses Dalgası [1]

Şekil 2.2’de grafiksel olarak ses dalgaları gösterilmektedir. Ses dalgasının frekansı adım ile irtibatlıdır. Sesin şiddeti ise sesin yüksekliği ile irtibatlıdır. B eğrisinde adım A eğrisine göre daha yüksek sesi göstermektedir bunun nedeni eğri ile gösterilen anlık hava basıncı değişimleri yatay eksenini daha sık kesmektedir. Sesin şiddeti ise eğrinin y eksenini üzerindeki yüksekliği ile ifade edilebilir; C eğrisi ile ifade edilen sesin şiddeti A eğrisi ile ifade edilen sesin şiddetinden $Y > X$ olduğu için daha yüksektir. [1]

2.4 Ses Basıncı

Ses, atmosferik basıncın anlık değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Ses basınç farklılıklarının medyanı ölçümlenecek olursa bu değeri sıfır olarak görürüz, bunun nedeni eksi yönlü seyrelme olduğu kadar artı yönlü sıkıştırma mevcuttur. Tüm bu nedenlerden dolayı ses basıncının ortalaması anlamlı bir ifade değildir. Eksi yönlü seyrelme etkilerini artı yönlü sıkıştırma etkileri ile toplamayı destekleyen bir ifade bulunması gerekmektedir.

Karekök ortalama (rms) ses basıncı tam olarak buna uygun bir ölçüdür. Rms ses basıncı anlık ses basıncı farklılıklarının karesi olarak ifade edilir. Ardından karesi alınmış ifadeler toplanarak zamana göre ortalaması alınır. Rms ses basıncı sonuç olarak elde edilen bu ifadenin kareköküdür. Kare alınarak tüm negatif ses basınçlarını pozitif kare ifadelerine dönüştürdüğü için rms ses basıncı sonuçta sıfır olmayan bir ifadedir. Ses basıncı mikro paskal (μPa); newton/m² (N/m²); mikro bar (μbar); ve dyne/cm² (d/cm²). Birimler $1 \mu\text{bar} = 1 \text{ d/cm}^2 = 0.1 \text{ N/m}^2 = 0.1 \text{ Pa}$ olacak şekilde ilişkilendirilebilir. [1]

2.5 Ses Yüksekliği

Ses yüksekliği büyük oranda ses basıncından etkilense de frekansa göre de değişebilmektedir. Bu durum insan kulağının yüksek frekanslı seslere düşük frekanslı seslerden daha duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Hava ile taşınan seslerin duyulabildiği frekans üst sınırı özellikle kişinin işitme durumuna ve ses şiddetine bağlıdır. Orta yaşlılar için bu üst sınır genellikle 16,000 ile 20,000 Hz arasındadır. Ancak, bir çok insanın yaşlandıkça yüksek frekanslı seslere olan duyarlılığını yitirdiğini ortaya çıkarmak önemlidir.

Ses yüksekliği, insanın ses basınç ve şiddetine olan sübjektif tepkisidir. Belli bir frekansta ses yüksekliği doğrudan ses basıncı ve şiddeti değiştikçe değişir, ancak doğrusal olarak değişmez. [1]

2.6 Akustik Empedans

Akustik empedans nesnenin yüzeyindeki ses basıncının, sesin partikül hızına oranı olarak MKS raylı birim sisteminde $N.s.m^{-3}$ ile ifade edilmektedir. Değişik ortamlarda ses dalgalarının ilerleyişi esnasında yüzey tarafından uygulanan direnci göstermektedir. Akustik empedans genellikle karmaşık sayı olup gerçel kısım, enerji kaybını gösterirken, imajiner kısım ise faz farklılıklarını göstermektedir. [3].

2.7 Oktav Bantları

İnsan kulağı 2×10^{-5} Pa ile 20 Pa'a kadar olan sesleri işitebilmektedir. İncelenecek frekans bandı çok geniş olduğundan analizler çok uzun zaman alabilmektedir. Bu nedenle, analiz edilecek sesin frekans aralığı oktav denilen aralıklara bölünür. Bir oktav bandında, bandın üst sınır değeri, alt sınır değerinin iki katıdır ve herbandın üst sınır değeri, bir sonraki bandın alt sınır değeridir. Her bandın merkez frekansı ise alt ve üst sınır değerlerinin geometrik ortalamasıdır. Alt sınır değeri f_1 ve üst değeri f_2 ve merkez frekans f_0 olmak üzere;

$$f_0 = \sqrt{2}f_1 = f_2/\sqrt{2} \text{ (Hz)} \quad (2.1)$$

Bant genişliği ise alt ve üst sınır değerleri arasındaki farktır.

$$b_w = f_2 - f_1 \text{ (Hz)} \quad (2.1)$$

2.8 Ses Yutum Katsayısı

Ses yutma katsayısı bir yüzeyde yutulan ses enerjisinin o yüzeye gelen toplam ses enerjisine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (2.1)$$

Ses yutum katsayısı (α) ile ifade edilmektedir. Bu değer 0 ile 1 arasında değerler alabilir. Bu değer 0 olduğunda yansıtıcı yüzeyleri, 1 olduğunda ise yutan yüzeyleri ifade etmektedir.

Yüzeyin ses yutum katsayısı malzemenin yapısal ve geometrik özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ses yutumu ise yüzey alanı ile yutum katsayısının çarpımı şeklinde ifade edilmektedir. Brimi Sabin'dir.

2.9 Ses İletim Kaybı

Ses iletim kaybı desibel cinsinden bir malzeme ses sönüm kapasitesini gösteren bir niteliğidir. Denklem 2.2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$TL = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad (2.2)$$

Burada, W_1 malzemenin üzerine gelen toplam ses enerjisi, W_2

ise iletilen ses enerjisidir. Ses iletim katsayısı,

$$T = \frac{W_2}{W_1} \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanacak olursa, ses iletim kaybı, iletim katsayısı cinsinden,

$$TL = 10 \log \frac{1}{T} \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

olarak yazılabilir. Ses sönümüyle ilgili olarak bir malzemenin ses iletim katsayısının küçük olması nedeniyle ses iletim kaybının büyük olması beklenir. Malzemenin iletim kaybı büyük oranda yüzey yoğunluğuna göre değiştiği gibi frekans ve malzeme özelliklerine göre de değişmektedir. [1].

2.10 Hız

Ses hızı dalganın ardışık kısımlarındaki benzer basınç noktalarının belli bir noktayı geçiş hızı olarak tanımlanmaktadır. Ses hızı her zaman dalga boyu ile frekansın çarpımına eşittir:

$$c = f \lambda \quad (2.3)$$

Formülde c = ses hızı (feet ya da metre/saniye); f = ses frekansı (Hertz); λ = dalga boyu (feet ya da metre).

Ses dalgası hava, su ve katı ortamlar gibi kütle ve elastiklik nitelikleri bulunan ortamlarda yayılmaktadır. Yayıldığı ortamın cinsine göre ses dalgasının yayılma hızı farklı olacaktır. Örnek olarak sesin havada yayılma hızı 331 m/s iken su da 1500 m/s, çelikte ise 6000 m/s hızına kadar olabilmektedir.

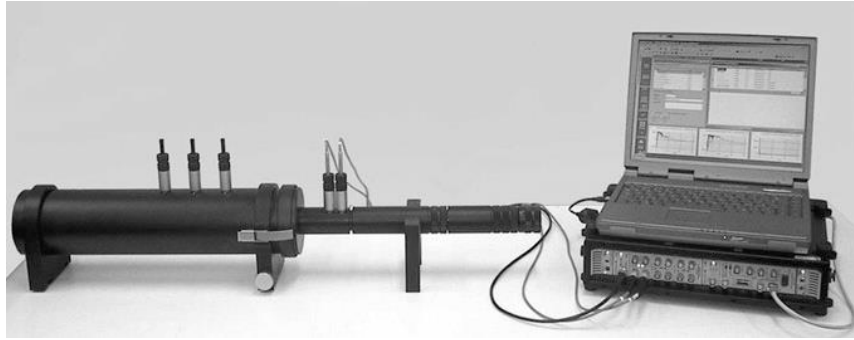
3. AKUSTİK PARAMETRE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Uygulamada yaygın olarak akustik parametre ölçümlerinde 3 metod kullanılmaktadır. Bu metodların test süresi,

3.1 Empedans Tüpü

Empedans tüpü ölçüm yöntemi testte kullanılan numunelerin kolay üretilebilmesi, numune boylarının küçük olması ve test sürelerinin kısa olması bakımından oldukça kullanışlı sistemlerdir.

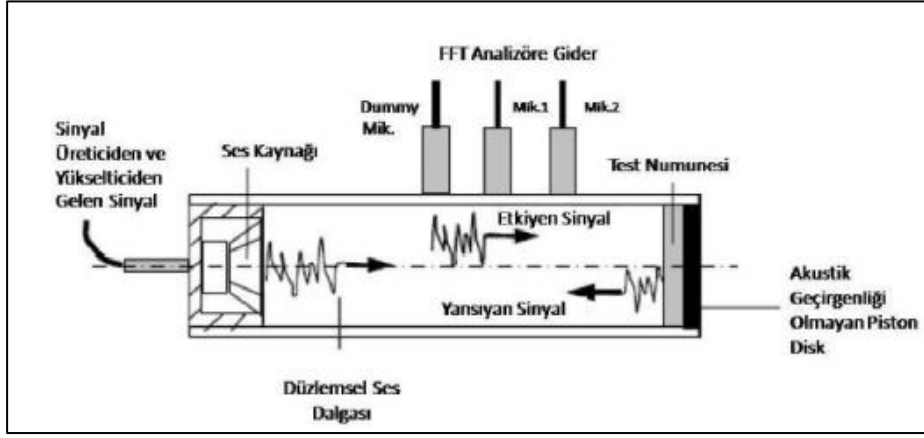
Empedans tüpü ölçüm metodu, test numunesinin yüzeyinde oluşan akustik empedansının etkiyen ve yansıyan ses dalgalarının ölçülmesi ile bulunması ve elde edilen yüzey empedansı değerinden ses yutum katsayısı değerlerinin hesaplanması prensibine göre çalışır.



Şekil 3.1 : Empedans tüpü ölçüm yöntemi test düzeneği [2].

Standartlara girmiş ve “Transfer Function” (Transfer Fonksiyon) metodu olarak adlandırılmış yöntem yeni sistem empedans tüplerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin avantajı, yüzey empedansı ve ses yutum katsayısı değerlerinin bütün frekanslar için tek bir ölçümde elde edilmesidir.

Şekil 3.1’de bu yöntemi içeren ölçüm sisteminin şeması verilmektedir. Transfer fonksiyonu şeklinde görülen iki mikrofon arasında ölçülmektedir. Şekil 3.2’de empedans tüpü ölçüm yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Empedans tüp ölçüm yöntemi [2].

Sesin karakteristiğini belirleyen sinyal, test sisteminin kullandığı yazılım vasıtasıyla üretilir. Daha sonra yükselticiden geçen sinyal, hoparlör aracılığı ile tüpün içerisinde düzlemsel ilerleyen ses dalgasına dönülür. Empedans tüplerinde testler için kullanılan gürültü beyaz gürültüdür.

Transfer fonksiyonunun sadece basınçların bir oranı olduğu hatırlanırsa; iki mikrofon arasındaki transfer fonksiyonu, iki mikrofondan ayrı ayrı ölçülen basınç değerlerinin bir oranıdır.

Bu oran transfer fonksiyonunu verir, transfer fonksiyonu değerleri yansıma çarpanı ile ilişkilendirilerek, elde edilen yansıma çarpanından (R) o frekansa ait ses yutum katsayısı değeri bulunur.

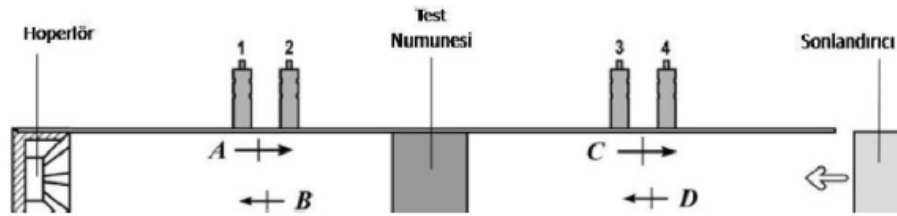
Eğer hazır bir test sistemi kullanılıyorsa bütün bu hesaplar yazılım içerisinde halledilir.

Kararlı dalga metodu tüp içerisinde oluşan en yüksek basınç seviyesi ve en düşük basınç seviyelerinin yakalanması prensibine dayanır. Tüp içerisinde maksimum basınç, etkiyen ve yansıyan dalgaların aynı fazda olması durumunda, minimum basınç ise bu dalgaların ters fazda olması halinde oluşur. Bu ölçüm yönteminde tek bir mikrofon kullanılır ve her defasında bir frekansa karşılık gelen ses yutum katsayısı değeri bulunabilir. Bu yöntem Transfer Fonksiyonu metoduna göre daha güvenilir

sosnuçlar verse de, test sürelerinin uzunluğu sebebi ile yeni tip empedans tüplerinde kullanılmamaktadır. [2]

3.2 Ses İletim Kaybı Ölçümleri

Empedans tüpüne ek aparatlar kullanılarak İngilizce karşılığı 'Transmission Loss (TL)' olan ses iletim kaybı ölçümleri yapılabilmektedir. Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilen test düzeneğinde test numunesi tüplerin arasına konularak iki farklı ortam oluşturulmaktadır. İkinci ölçüm ortamının sonuna sonlandırıcı konularak ve tüpün ucu açık şekilde iki kez test yapılarak ikinci ölçüm ortamındaki yansıyan ses dalgasının denklemden kaldırılmış olur. Şekil 3.3'de c olarak ifade edilen ve etkiyen dalganın tamamen sönümlenmesini sağlayan bu yolla denklemden D ile gösterilen yansıyan dalganın sıfır değerini almasını sağlayan bir alettir.



Şekil 3.3 : Ses iletim kaybı ölçümü [2].

3.3 Çınlanım Odaları

Çınlanım odalarında yapılan testler uluslararası standartlar dahilinde yapılan ölçümlerdir. Dolayısı ile çınlamanın odalarında yapılan testler diğer ölçüm yöntemlerine göre daha güvenilir kabul edilir.

Çınlanım odaları kullanım olarak çok büyük alanlara ihtiyaç duyar. Genellikle titreşim ve gürültülerden en az etkilenmek için zemini ayrı bir yerde binadan bağımsız bir şekilde kullanılması gerekir. Odanın kalibre edilmesi zahmetlidir ve

uzman kişiler tarafından yapılmadığı takdirde test sonuçları başka çınlanım odalarında yapılan testlerin sonuçlarına göre oldukça farklılık gösterebilir.

Ayrıca test numeleri ASTM C423 standardına göre en az 6,69 m² ve ISO 10140 10 m² ve üzerinde olmalıdır.

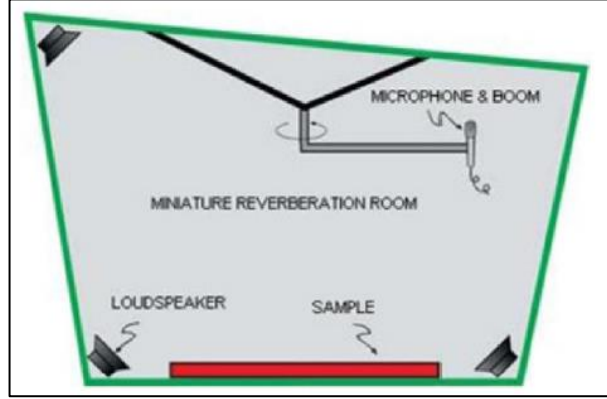
Çınlanım odaları uzun test süreleri ve yüksek ilk kurulum maliyetlerine karşın, bu odalarda yapılan testlerden elde edilen sonuçlar bütün kurumlar tarafından kabul görür. Çınlanım odalarında ses iletim kaybı ölçümleri için odanın içerisine duvar örmek gerekir. [2]

3.4 Alfa Kabin

Alfa kabinler adlarını alfa ses yutum katsayısından almaktadırlar. Yapıları itibari ile küçük birer çınlanım odalarıdır.



Şekil 3.4 : Alfa kabin



Şekil 3.5 : Alfa kabin testinde ses yutum katsayısı ölçümleri

Kabinde testlere başlamadan önce öncelikli olarak hoparlörler çalışır durumda iken, kabin içinde oluşan gürültü seviyeleri ile dış ortamdan gelen (step motor gürültüsü, elektriksel gürültü) arka plan gürültü seviyelerini karşılaştırmak gerekir. Bu seviyeler arasındaki farkın en az 45 dB olması gerekir.

Alfa kabinlerin çalışma şekli çınlanım odalarına oldukça benzerlik gösterir. Ses yutum katsayısı hesabı için Sabine formülü kullanılır. Sabine formülü aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\alpha = \frac{0.163 \times V}{S} \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{TR_0} \right) \times C \quad (2.4)$$

Burada V: Kabin Hacmi, S: Numune Alanı, TR: Numune kabin içerisindeyken oluşan çınlanım süreleridir. “C” katsayısı hassas bir şekilde elde edilebilmesi için alfa kabin ile çınlanım odası ölçüm ortamlarının aynı olması (Sıcaklık, nem, basınç) ve çok sayıda numune kullanılması gerekmektedir. Ayrıca düzeltme katsayısı belirlenmesi amacı ile seçilen laboratuvarın, ölçümler için uluslararası uygunluk belgesine de sahip olması gerekmektedir. Karşılaştırma için ne kadar çeşitli laboratuvar bulunup testler yapılırsa o kadar iyi netice elde edilecektir. Çok sayıda laboratuvar ile yapılan bu testler için “Round Robin Test Metodu” önerilmektedir.

Alfa kabinlerin uluslararası bir standardı bulunmamaktadır. Uluslararası standartlar daha büyük ebatlı olan çınlanım odaları için mevcut olup, bu standartlar ses yutum katsayısı tayini için ASTM C423 ve ISO 354 standartları, ses iletim katsayısı tayini

içinse ASTM E90 ve ISO 10140 standartları kullanılmaktadır. Yukarıda bahsi geçen standartlar daha çok mimari akustik uygulamalarına yönelik olup, bu ihtiyaca göre şekillenmişlerdir. Bu sebeple otomotiv sektörü için elıştırılan alfa kabinler daha küçük ebatlarda olup (genellikle 6.44 m^3), henüz bir standartları bulunmamaktadır.

Alfa kabin tasarımları genellikle birbirine benzer olup, otomotiv sektöründeki firmaların kendi özel üretimleri ile yapılmaktadır. Alfa kabin üretiminde Rieter öncü rolü üstlendiği için, diğer firmaların kabinlerinin tasarımı da Rieter'in kabinlerine benzemektedir. Ölçülebilir alt frekansı, odanın iç hacmi tutturabilmek için, kabin tasarımı yapılırken alt frekans olan 400Hz frekans bandında ölçüm yapılabilir olması dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak 400Hz'de düzgün bir dağılık alan oluşabilmesi için hemen hemen bütün kabinlerin iç hacmi 6.44 m^3 belirlenmiştir.

Alfa kabinler ölçüm süreleri göz önüne alındığında oldukça hızlı sürelerde testleri yapabilmektedir. Fakat numune hazırlama süreci, empedans tüplerine göre genellikle daha uzun sürmektedir.

Sıcaklık ve nemin alfa kabin ölçümlerinde özellikle yüksek frekanstaki ölçüm sonuçlarında ve dolaylı olarak sıcaklık ve nemin yutum ölçümü yapılacak malzemenin iç yapı özelliklerini etkilemesi ile etkisi olabilmektedir. Alfa kabin ölçümlerinde kullanılan yazılımlar nem ve sıcaklığın etkisi ölçüm sonuçlarına korele edecek şekilde etkilemektedir. Dolayısıyla bu farkın kontrol altında tutulabilmesi için alfa kabin ölçümlerinde sıcaklığın $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ila $28 \text{ }^\circ\text{C}$ ve bağıl nemin % 50 ila % 65 arasında olması istenmektedir. [2]

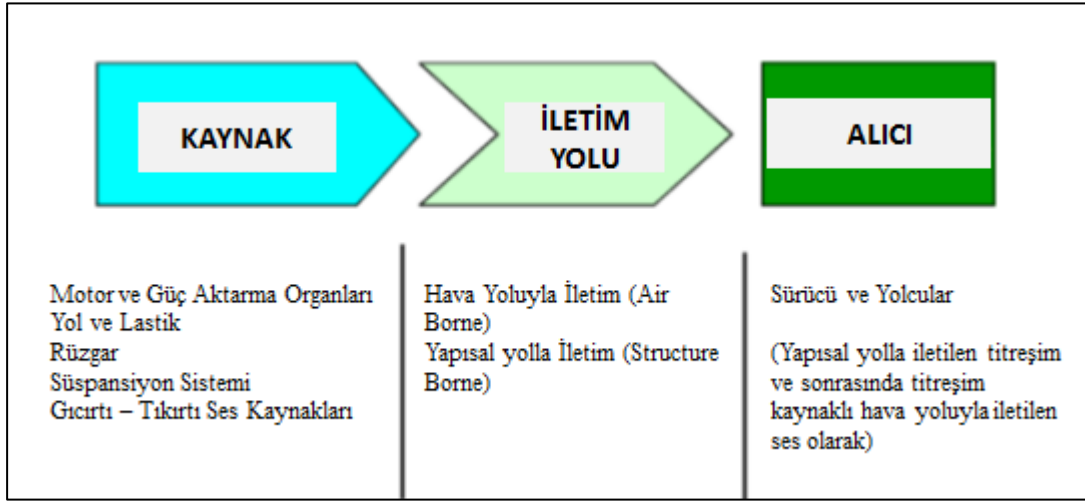
4. ARAÇ NVH ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

4.1 NVH Tanımı ve Otomotiv Endüstrisindeki Önemi

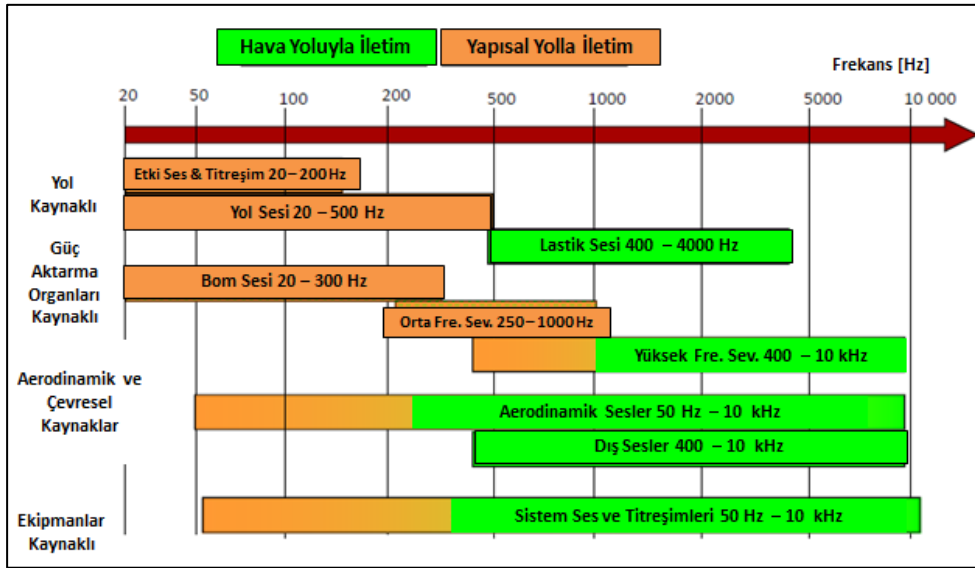
NVH adını İngilizce baş harflerini aldığı noise (ses), vibration (titreşim) ve harshness (sertlik) ifadelerinden almaktadır. Tüm bu parametreler aracın konforlu olmasını sağlayan en temel özelliklerdir. Son yıllarda otomotiv sektöründe artan rekabet ile birlikte otomotiv firmaları araştırma ve geliştirme departmanları içinde barındırdıkları araç mühendisliği ekipleriyle bu konu üzerine ciddi çalışmalar yürütülmektedir. Aracın en önemli ses ve titreşim kaynağı öncelikli olarak motor ve güç aktarma organlarıdır. Hızın saatte 100 km üzerine çıktığı yüksek hızlarda ise bu öncelik lastik ve aerodinamik etkenlere (rüzgar sesi, yol sesi) geçmektedir. Çalışmanın devamında araç ses ve titreşim kaynakları ile birlikte otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemeler detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

4.2 Araç Kabin İçi Ses İletimi

Araç kabin içi sesi yalnızca akustik ve titreşim kaynaklarından oluşmayıp aynı zamanda sesin kaynak ile alıcı arasındaki (sürücü ve yolcuların kulakları gibi) farklı iletim yollarıyla etkisi değişebilmektedir. Araçta ses iletimi ile ilgili 2 farklı iletim yolu vardır bunlar yapısal ve hava yolu ile iletim şeklindedir. Bu iletim şekilleri ses enerjisinin iletiminde tamamen farklı mekanizmalarla ilgilidir. Örneğin binek araçlar üzerinden yapılan çalışmalarda sesin yapısal iletimi düşük frekanslarda (< 200 Hz) gerçekleşirken hava yoluyla taşınan sesin frekansı 500 Hz'den fazladır. Orta frekans bandında her iki ses iletim yolu da aynı derecede büyük öneme sahiptir. Şekilde sesin kaynak ile alıcı arasındaki etkileşim açıklanmaktadır. Şekil 4.1 ve şekil 4.2'de ise araç ses ve titreşim kaynakları ve etkidikleri frekans aralıkları ile ilgili analiz bulunmaktadır.



Şekil 4.1 : Kaynak ve alıcı arası etkileşim

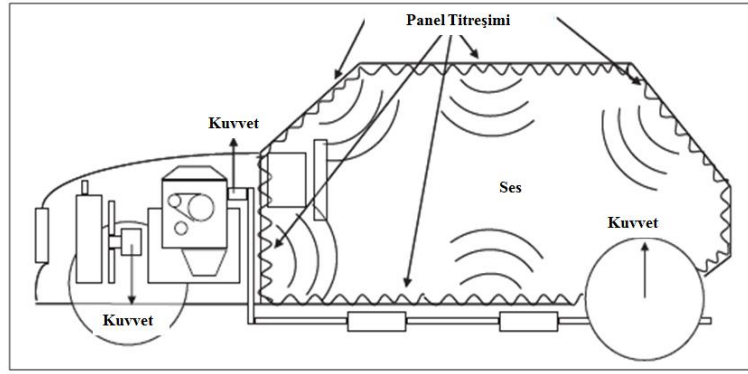


Şekil 4.2 : Araç ses ve titreşim kaynağı frekans analizi

4.2.1 Yapısal yolla ses iletimi

Yapısal olarak iletilen sesler, sesin kabini çevreleyen paneller tarafından kabin içerisine yayılması şeklinde iletilmektedir. Şekil 4.3’de ifade edilmek isteneni bir örnekle açıklama gerekirse aracın motoru çalışır durumda iken ciddi bir titreşim kaynağı durumdadır. Motor piston ve krank milinin aksenal ve dönel hareketleriyle oluşan bu titreşim motorun gövdeye bağlandığı motor kulakları ile gövdeye iletilir ve gövdeye aktarılan bu titreşim paneller vasıtasıyla sürücü ve yolcunun bulunduğu iç

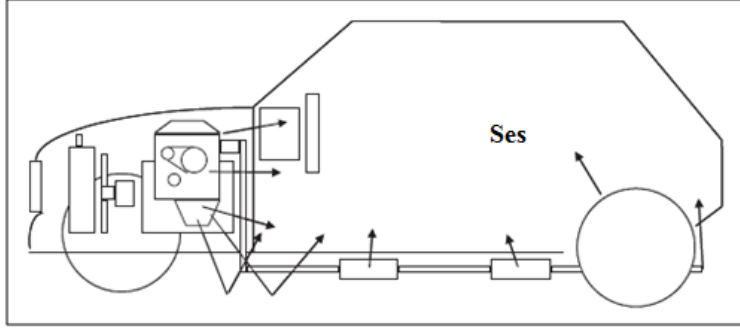
kabin etrafındaki tüm alana yayılmış olur. Panellerdeki bu titreşim enerjisi kabin içerisindeki hava boşluğuna ses ve titreşim olarak iletir. Yapısal yolla yayılan ses ve titreşimi engellemek için gövde sac panelleri ve motor kulağı ses ve titreşim seviyesinin sönümlenmesinde büyük bir öneme sahiptir. Bu iletimi engellemek veya etkisini en aza indirmek amacıyla motor kulaklarında sönümleyici kauçuk damperler ve gövde üzerinde de bu ses ve titreşimi sönümleyici ilave bir çok malzeme uygulanmaktadır.



Şekil 4.3 : Ses ve titreşim iletim yoluyla taşınım

4.2.2 Hava yoluyla ses iletimi

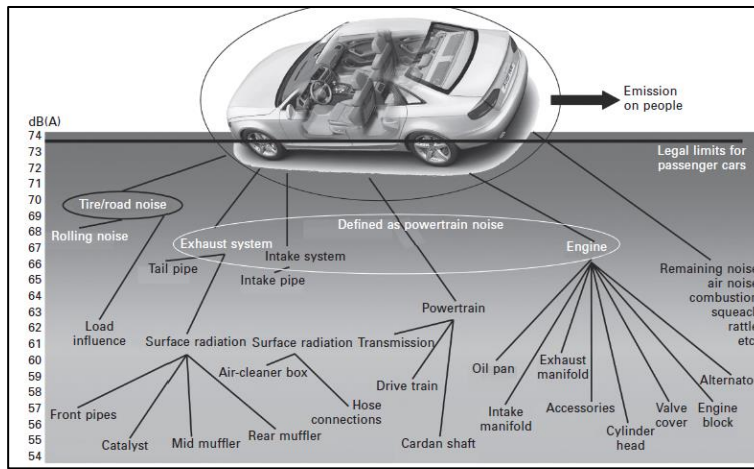
Hava yoluyla ses iletimi akustik ses iletim yolu olarak tamamen farklı bir iletim yoludur. Aracın motoru üzerinden örnek verecek olursak motor çalışır durumda iken motorun akustik bir ses kaynağı olduğunu düşünürsek ses hava yoluyla gövde üzerinde bulunan deliklerden ve gövde panelleri arasındaki boşluklardan iletilmektedir. Son durumda sesin akustik yayılımı aynı zamanda gövde panelleri üzerinde titreşim yaratacak ve bu panellerin titreşimi sonucunda kabin içerisine ses olarak iletilecek olsa bile burada üzerinde durulan konu hava yoluyla iletim sırasında daha çok sesin akustik yol ile iletilmesidir. Bu nedenle hava yoluyla iletimin engellenmesi için gövde panelleri üzerinde bulunan izole edilmemiş boşta deliklerin ve paneller arasındaki kaçakların izole edilmesi gerekir.



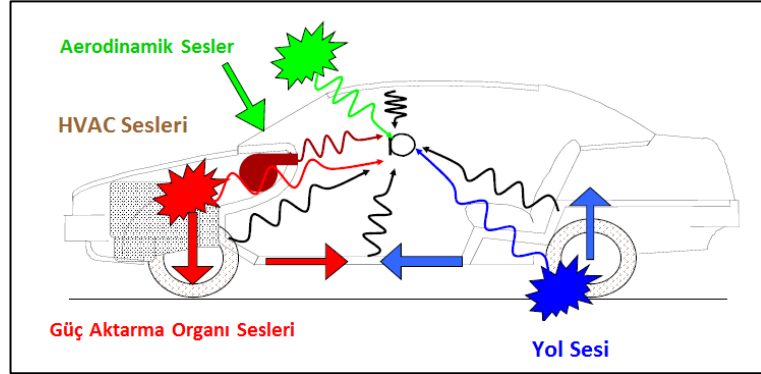
Şekil 4.4 : Ses ve titreşim hava yolu ile taşınımı

4.3 Araç Ses ve Titreşim Kaynakları

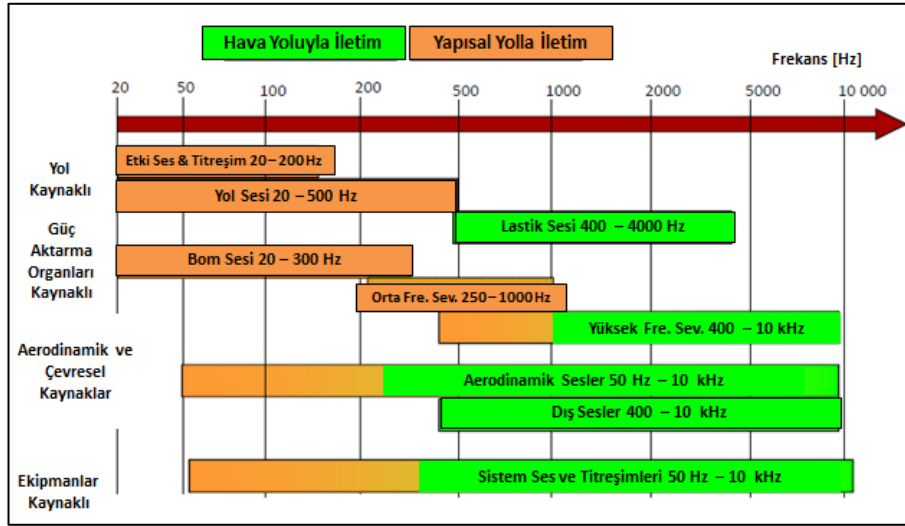
Araç sürüşü sırasında sürücü ve yolcuları etkileyen araç üzerinde bir çok akustik kaynak vardır. Bunların her biri için ses ve titreşimin yayılımını engellemek amaçlı akustik malzeme örnekleri kullanılmaktadır. Şekil 4.5’de görüleceği gibi bunları temelde altı ana gruba ayırabiliriz. Bunlar aracın motor ve güç aktarma organları, süspansiyon sistemi, lastik ve yol sesi, aerodinamik kaynaklar ve diğer ses ve titreşim kaynakları olarak özetlenebilir. Bu bölümde bu ana başlıklar açılarak araç üzerinde akustik etkiye sahip ses ve titreşim kaynakları incelenecektir. Şekil 4.6’de araç ses ve titreşim kaynakları ve etkidikleri frekans aralıkları ile ilgili analiz bulunmaktadır.



Şekil 4.5 : Araç akustiği ses ve titreşim kaynakları



Şekil 4.6 : Araç ses ve titreşim kaynakları



Şekil 4.7 : Araç ses ve titreşim kaynağı frekans analizi

4.3.1 Motor ve güç aktarma organları

Aracın motoru kabin içi gürültü kaynağı anlamında büyük bir öneme sahiptir. İçten yanmalı motorlar elektrikli motorlara göre daha gürültülü ve daha fazla titreşimi araç içerisine verirler. Motor kaynaklı titreşimler daha çok piston, krank mili ve şaft gibi yüklerin aksel ve dönel hareketleriyle meydana gelmektedir. Bu sebeple bu yüklerin dengelenmesi araç akustiği açısından büyük öneme sahiptir. Diğer titreşim kaynakları ise şanzıman, diferansiyel, egzost sistemi, alternatör, valfler, zincilerler ve kayış sisteminden kaynaklanmaktadır.

4.3.2 Süspansiyon sistemi

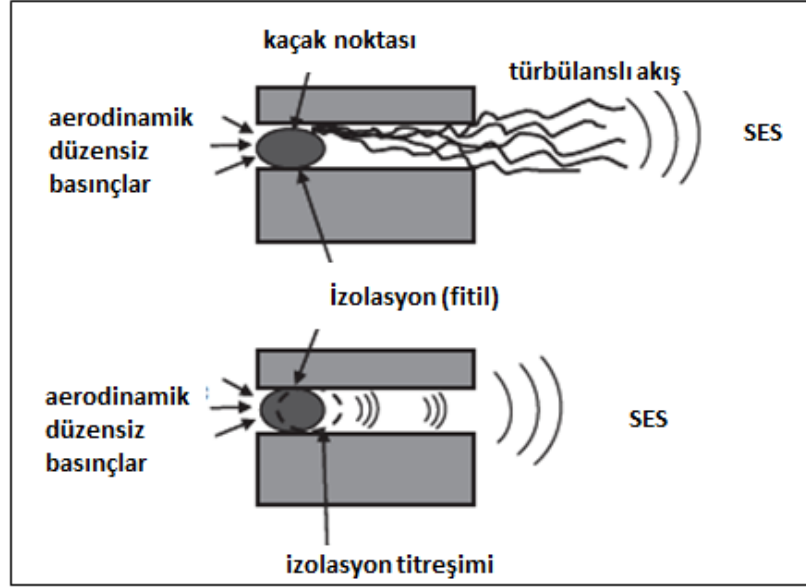
Aracın süspansiyon sistemi gövde ile lastik-yol etkileşimi arasındaki ses iletim yolu üzerinde bulunmaktadır. Bu sebeple bu sistemin dizaynı mutlaka çok iyi bir şekilde titreşimi arada yok edecek şekilde yapılmalıdır. Süspansiyon geometrisi, burçların diğer sistem elemanlarıyla olan bağlantıları, braketlerin ve diğer süspansiyon elemanlarının esnekliği ve kütle dağılımı aracın dinamik davranışları ve lastik- yol etkileşimi arasında oluşan sesin sönümlenmesinde büyük öneme sahiptir. Süspansiyon sisteminin aynı zamanda kendisi de bir ses kaynağıdır. Amortisörler içerisindeki yağın akışı ve amortisörün yüksek yük altındaki maksimum yer değiştirmesi bunlara birer örnektir.

4.3.3 Lastikler

Lastikler aracın yol ile temas halinde bulunan parçalarıdır. Yol sesinin oluşmasında ve taşınmasında etkin role sahiptir. Lastik sırtının geometrisi ve lastik yüzeyinin yol ile etkileşimi sırasındaki titreşimi sesin hava yoluyla iletimi ile taşınır.

4.3.4 Aerodinamik kaynaklar

Araçlardaki aerodinamik sesler son yıllarda ciddi bir öneme sahip olmuştur. Özellikle aracın 100 km/h gibi nispeten yüksek sayılacak hızlarında aerodinamik etkenler önemli bir etki değerine sahiptir. Aerodinamik ses kaynakları farklı bölümlere ayrılmaktadır. Bunlar, türbülans sesleri, yüksek frekanslı sesler (aracın ön direkleri, araç altı hava akış sesi, yan aynalar, radyo anteni ve ön cam bölgesinden gelen aerodinamik sesler) ve son olarak araçta ses izolasyonu için bulunan fitillerden kaçak oluşması kaynaklı aerodinamik seslerdir. Bu kaçakları engellemek için araçların ön ve arka kapı cam direkleri birleşim bölgelerine bütül mastik uygulaması yapılmaktadır. Ayrıca aracın sürüşü sırasında aerodinamik etkiden dolayı ön cam bölgesindeki rüzgar sesi şikayeti için de akustik lamine (PVB) kaplı ön camlar kullanılmaktadır. Bu camlar kabin içi ile dış ortam arasındaki akustik geçirgenliği azaltarak kabin içinin normal camlara göre daha sessiz olmasını sağlamaktadır. Akustik lamine camlar daha sonraki bölümlerde detaylı olarak işlenecektir.



Şekil 4.8 : Siler malzemeli ve siler malzemesiz ses iletimi [5]

4.3.5 Gıcırtı ve tıkırtı ses kaynakları

Bu sesler aracın iç trimlerinin (kaplamalar, ön göğüs, gösterge paneli, koltuklar vs) dinamik hareketleri sırasında kaydedilen seslerdir. Gıcırtı sesi daha çok gövde kaynaklı olup gövde üzerindeki sac panellerin gövde esnemesi sırasında birbirine temas edip ayrılması şeklinde görülmektedir. Bu ses modunu engellemek için aracın esneme esnasında panellerin birbirine temas edebileceği bölgelerine siler denilen viskoelastik malzemeler uygulanır. Tıkırtı sesi ise birbirine komşu yüzeylerin etkileşimi sonucunda görülmektedir. Tıkırtı sesleri daha çok yüksek frekans bandında (200-2000 Hz), gıcırtı sesleri ise (500-5000 Hz) bandında görülmektedir.

4.3.6 Diğer ses kaynakları

Tüm bu ana ses kaynakları haricinde araçta farklı ikincil ses kaynakları bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak fren balaları (frenleme esnasında cıyıklama sesi), elektriksel ve mekanik komponentler kaynaklı ses kaynaklarını verebilir.

4.4 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Akustik Malzemeler

Otomotiv ürünlerinde kullanılan akustik malzemelerin önemli her geçen gün artmaktadır. Artan rekabet ortamıyla birlikte maliyetlerin minimize edilmesi için özellikle müşteri tarafından direkt olarak görünmeyen otomobil parçalarında çeşitli maliyet azaltma çalışmaları yapılmaktadır. Ses ve yutum özelliği olan bu sönüm malzemeleriyle ilgili olarak da fonksiyonel olarak bekleneni karşılayan ve maliyet olarak sürdürülebilir malzemelerin araştırmalarına yoğunluk verilmiştir.

Otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan malzemeler bir çalışmada John Long ve Andrea Zent'in belirttiği gibi daha çok elyaf ve türevleri, çok katmanlı kompozit yapılar, mikrofiberler bulunmaktadır.[6] 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. Şekil 4.9 ve şekil 4.10'da görülen akustik malzeme örneği geri dönüşüm yoluyla elde edilerek akustik malzeme olarak birleştirilmiş pamuk, keten malzeme örneği daha çok aracın ön göğüs kısmında izolasyon amaçlı kullanılmaktadır.



Şekil 4.9 : Koton keçe akustik malzeme örneği



Şekil 4.10 : Ön göğüs ses izolasyonu uygulama örneği

Otomotivde yaygın olarak kullanılan diğer bir akustik malzeme de Şekil 4.11 ve şekil 4.12’de görülen Polietilen tereflat ismiyle kısaca (PET) olarak bilinen mikrofiber yapıli malzemedir. Bu malzeme çok kolay uygulanabilmesi, sesi ve titreşimi çok iyi sönümlerme özelliği bulunduğu için aracın özellikle trim kaplamaları altlarında sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 4.11 : PET mikrofiber akustik malzeme örneği

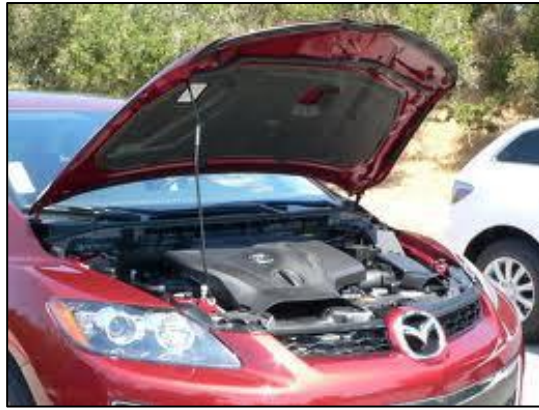


Şekil 4.12 : Trim döşemesi PET mikrofiber uygulama örneği

Polietilen tereflat aynı zamanda yol sesini engellemek üzere şekil 4.13’de görüleceği üzere tekerlek davlumbaz alt bölgelerine ve motor kaynaklı hava yoluyla iletilen güç aktarma organları seslerine karşın şekil 4.14’deki gibi kaput altına ve motor kapağı iç kısmına şekilde görüldüğü gibi uygulanmaktadır.

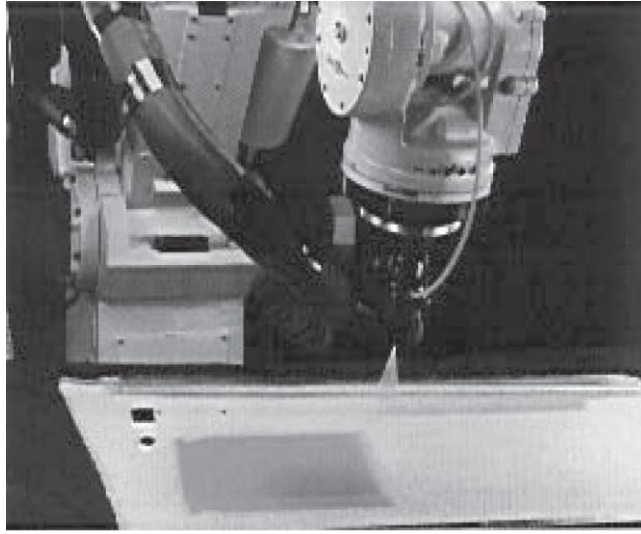


Şekil 4.13 : PET mikrofiber davlumbaz altı uygulama örneği



Şekil 4.14 : Pet mikrofiber kaput altı uygulama örneği

Otomotiv endüstrisinde gövde üzerinden iletim yoluyla yayılan ses ve titreşimleri engellemek için sıklıkla uygulanan ve titreşim sönümlenme özelliği bulunan şekil 4.15 ve 4.16'da görülen malzemenin gövde üzerine katman halinde çoğunlukla spreyle şeklinde aracın üretimi sırasında uygulanmasıdır. Bu titreşim sönümleyici katman genellikle kauçuk, epoksi veya PVC malzemenin yapılmaktadır. Çevre kirliliğini engellemek için kullanılan bu viskoelastik malzemelerin kürlendikten sonra düşük yoğunluk özelliklerine sahip su bazlı malzemeler olmasına dikkat edilmektedir.

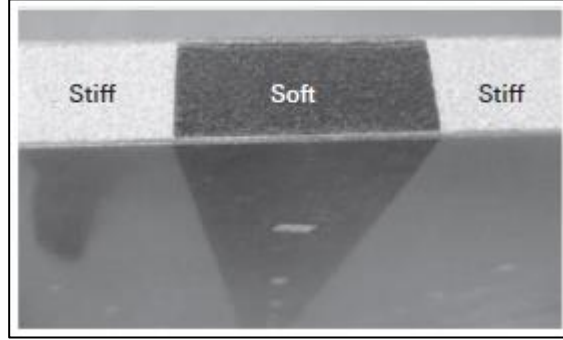


Şekil 4.15 : Püskürtmeli pvc uygulaması [4]



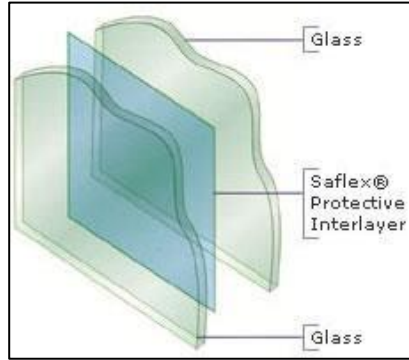
Şekil 4.16 : Araç gövdesi üzerindeki titreşim sönümlenme elemanları

Gövde kaynaklı titreşimleri engellemek için diğer bir uygulama ise sandviç yapıların kullanılmasıdır. Bu uygulamada ana sert malzeme arasına titreşimi sönmöleyecek viskoelastik malzemenin kullanılmasıdır. Burada şekil 4.17’de gösterilen titreşim sandviç yapı içerisinde bulunan viskoelastik malzeme daha çok olacak şekilde sert tabaka ile paylaşılması suretiyle sönmölenir. Otomotiv endüstrisinde bu uygulamaların ince alüminyum levhalar üzerine sertliği düşük ve yapışkan viskoelastik malzeme ile kaplanması veya iki ince lamine çelik levha arasına ince katman viskoelastik malzemenin uygulanması şeklindedir. Bu uygulamaya “Quiet Steel” olarak bilinen sessiz çelik uygulaması denilmektedir.



Şekil 4.17 : Titreşim sönmöleyici sandviç yapı örneği [4]

Aracın sürüşü esnasında oluşan aerodinamik etki ile ön cam bölgesindeki rüzgar sesi şikayetlerini engellemek için Şekil 4.18’ de görölen iki cam arasına polivinil bütrol (PVB) malzemesinin ısı ve basınç altında birleştirilmesiyle oluşan akustik cam denilen ön camlar kullanılmaktadır.

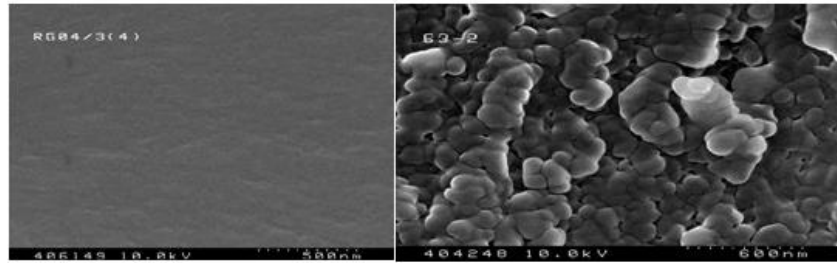


Şekil 4.18 : Polivinil bütrol (PVB) uygulaması

PVB kaplı akustik camlar hem hava yoluyla taşınan hem de yapısal olarak taşınan ses ve titreşim sönümlenme konularında oldukça başarılıdır. Jun Lu'nun bir çalışmasında da belirttiği gibi özellikle dizel motor gibi çalışma sırasında ürettiği ses miktarı benzinli motorlara göre daha fazla olan ses seviyesinde 6 dB gibi ciddi bir oranda iyileşme sağladığı görülmektedir.

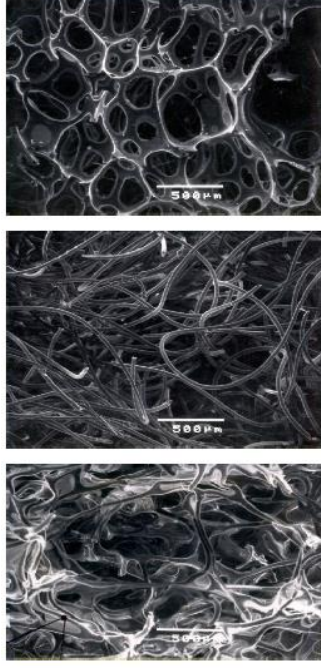
PVB kaplı akustik camların kullanılmasının bir başka faydası da yakıt tüketimi konusunda kullanıcı dostu olmasıdır. Normal cama sahip araçlara göre PVB kaplı akustik camlı araçların 3.5 kg daha hafif olduğu görülmüştür. Bu özelliğinden dolayı aynı zamanda CO₂ salınımını azaltarak çevre dostu bir uygulama olduğunu da söyleyebiliriz.

Otomotiv sektöründe kullanılan diğer bir akustik malzeme de kimyasal ve morfolojik yapısı değiştirilerek gözenek ve hava akış direnci artırılmış şekil 4.19'da gözene yapısı görülen Acoustiflex malzemedir. Bu malzeme Huntsman ve arkadaşları tarafından yoğun çalışmalar sonucunda elde edilerek patentlenmiştir. [9]



Şekil 4.19 : Poliüretan sert köpük ile Acoustiflex malzeme yapısı [9]

Acoustiflex malzemenin temel özelliği akustik performansından ödün vermeden aynı sönüm kabiliyetini çok daha düşük yoğunluk ile sağlamasıdır. Örneğin Şekil 4.20'de morfolojik özellikleri gösterilen akustik malzemelerden en üstte bulunan sıradan poliüretan köpüğün yoğunluk değeri 40 kg/m³, ikinci poliüretan fiber malzemenin yoğunluğu 35 kg/m³ ve son olarak Acoustiflex köpük malzemenin ise yoğunluk değeri 15 kg/m³'tür. [9]



Şekil 4.20 : Acoustiflex ve polüretan köpüklerin morfolojik özellikleri [9]

5. AKUSTİK PERFORMANSI ETKİLEYEN MALZEME ÖZELLİKLERİ

Malzemelerin bir çok özelliğinin akustik performansa etkisi büyüktür. Malzemenin özellikleri katı ve akışkan olmaz üzere iki farklı faz olarak incelenmektedir. Burada katı faz malzemenin kendisi, akışkan faz ise hava olarak sınırlandırılan alandır.

Ses yutum katsayısının belirlenmesinde katı ve akışkan fazlar birlikte etkirler. Ses iletim kaybında ise havanın malzeme içerisine nüfuz etmesi istenmediği için katı faz etkin olmaktadır.

Aşağıda çizelge 5.1 'de malzemenin akustik performansına etkiyen özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Akustik Parametrelere Etkiyen Malzeme Özellikleri.

Özellik	Sembol	Açıklama
Gözeneklilik	ϕ	Gözeneklilik, toplam gözenek hacminin toplam yutum malzemesinin hacmine oranıdır.
Hava Akış Direnci	σ	Spesifik hava akış direnci, havanın gözenekli bir yapı içerisine ne kadar kolay girebildiği ve bu sırada maruz kaldığı direnci gösteren bir özelliktir.
İç Yapı Dağınıklığı	a	Ses dalgaların yarattığı basınçla ilerleyen hava partiküllerinin yapı içerisinde karmaşık bir yol izlemesinden kasıt malzemenin iç yapı dağınıklığıdır.
Kayıp Faktörü	η	Yapısal sonum kayıp oranıdır. Bu oran, yapı icinde sonum soz konusu olduğunda; viskoz dampingte kullanılan kritik sonum oranının yerine geçer. Yapısal Sonum frekansa bağlı olarak değişen bir orandır. Frekans arttıkca yapısal sonum değerleri düşer.
Yoğunluk	ρ	Yoğunluk

5.1 Gözeneklilik

Gözenekli tüm malzemelerin belli bir miktar ses sönümlenme özelliği bulunmaktadır. Gözenek sayısı, büyüklüğü ve tipi malzemenin ses sönümlenme özelliği için önemli rol oynamaktadır. Sesin malzeme içerisinde sürtünme yoluyla sönümlenebilmesi için ses enerjisinin malzemenin gözenekli yapısına giriyor ve bu yapıda ilerliyor olması gereklidir. Bunun anlamı, sesin malzeme içerisinde sönümlenebilmesi için malzeme yüzeyinde yeterince gözenek bulunması gerekliliğidir. Malzemenin gözenekliliği toplam gözenek hacminin, malzemenin toplam hacmine oranı olarak özetlenebilir. Şekil 5.1’de gözeneklilik ile ses sönüm katsayısı değişimi verilmiştir.

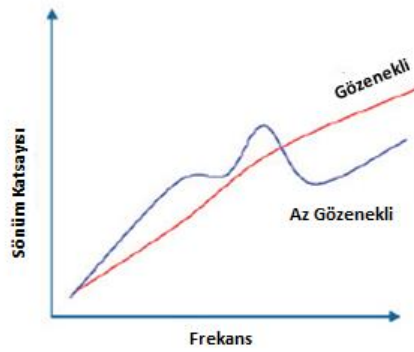
$$H = \frac{V_a}{V_m} \quad (6.3)$$

Burada:

H: Gözeneklilik Oranı

V_a : Toplam gözenek hacmi

V_m : Yutum malzemesinin toplam hacmi



Şekil 5.1 : Gözeneklilik ile ses sönüm katsayısı değişimi [7]

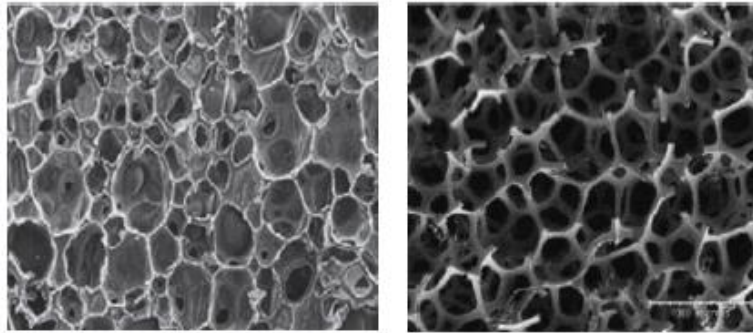
5.2 Gözenek Hücre Yapısı

Sönüm malzemesi üzerindeki gözeneklerin sayı, boyut ve tip çeşitliliğinin gözenekli malzemelerin sönüm kabiliyeti üzerine etkisi büyüktür. İyi bir sönümleme özelliği için sönüm malzemesi üzerinde ses dalgalarının içine girip ilerleyebileceği yeterli sayıda açık hücre gözenek sayısına sahip olması gerekmektedir.

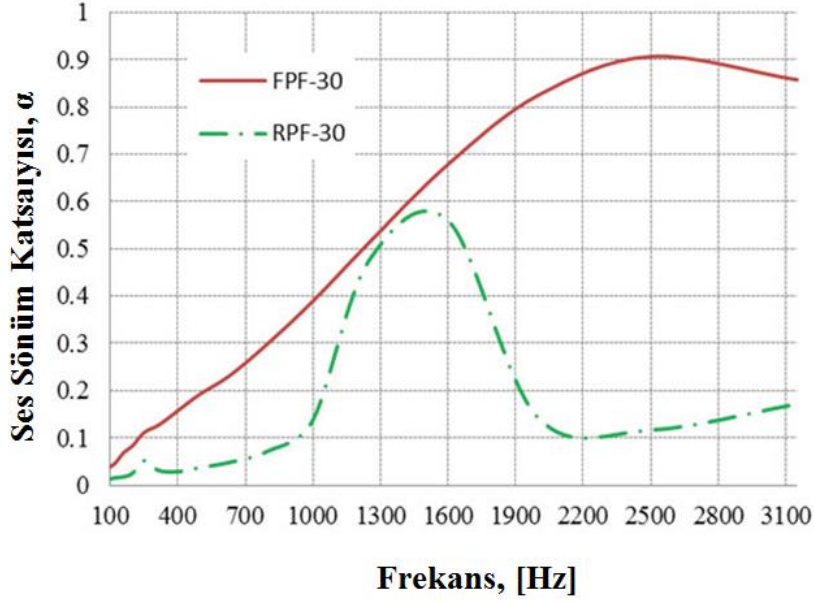
Ancuta ve arkadaşları (2014) şekil 5.2 ve şekil 5.3’de görülen rijit kapalı hücre ve esnek açık hücreli gözenek yapısına sahip 30 mm eş kalınlık değerine sahip poliüretan (PU) köpük ile sönüm katsayısı ölçümü yapmış ve sonuçta şekil 5.4’te görüldüğü gibi açık hücre gözenek yapısına sahip malzemenin, malzemelerin benzer sönüm kabiliyeti özelliğini gösterdiği 1250 – 1600 Hz değerleri dışında çok daha iyi sönüm kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. [12]



Şekil 5.2 : Esnek ve rijit poliüretan köpük [11]



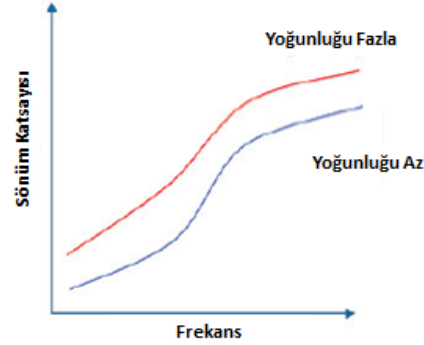
Şekil 5.3 : Rijit kapalı hücre ve esnek açık hücre gözenek yapısına sahip poliüretan (PU) köpükler [12].



Şekil 5.4 : Açık ve kapalı hücre gözenek yapısına sahip poliüretan köpük sönüm katsayısı karşılaştırması [12].

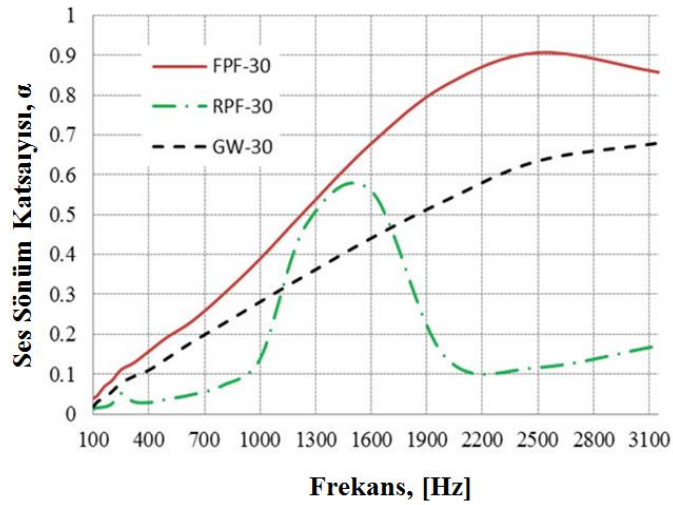
5.3 Yoğunluk

Yoğunluk malzemenin ses sönümlenme özelliklerinden bir diğer önemli özelliğidir. Aynı zamanda akustik bir malzemenin maliyeti direkt olarak malzemenin yoğunluğuyla ilgilidir. Akustik alanda yapılan çalışmalarda orta ve yüksek frekans bandında yüksek yoğunluklu malzemelerin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Lifli malzemelerde malzeme yoğunluğu arttıkça birim alan başına düşen lif sayısı doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla sürtünme arttıkça sönümlenen ses enerjisi de artmakta ve ses sönüm katsayısı da buna bağlı olarak artmaktadır. Şekil 5.5’de yoğunluk ile ses sönüm katsayısı değişimi arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 5.5 : Yoğunluk ile ses sönüm katsayısı değişimi [7]

Ancuta (2014) farklı yoğunluklara sahip üç malzeme ile yoğunluğun sönüm katsayısı üzerine etkisini incelediği çalışmasında 40 kg/m^3 yoğunluğa sahip esnek poliüretan köpük (FPF-30), 60 kg/m^3 yoğunluğa sahip rijit poliüretan köpük (RPF-30) ve 15 kg/m^3 yoğunluğa sahip camyünü (GW-30) kullanmıştır. Tüm numunelerin kalınlık değerleri eşit ve 30 mm olarak seçilmiştir. Sonuçta şekil 5.6'te görüldüğü gibi esnek 40 kg/m^3 yoğunluğa sahip poliüretan köpüğün en iyi sönüm kabiliyetine sahip olduğu, 15 kg/m^3 yoğunluğa sahip camyünü malzemenin ise esnek poliüretan malzemedan daha kötü fakat rijit poliüretan köpük malzemenin daha iyi sönüm özelliği gösterdiği 1200 ile 1700 Hz aralığı dışında tüm frekanslarda daha iyi sönüm kabiliyeti özelliğine sahip olduğu görülmüştür. [12]



Şekil 5.6 : Yoğunluğun sönüm katsayısı üzerine etkisi [12].

5.4 Hava Akış Direnci

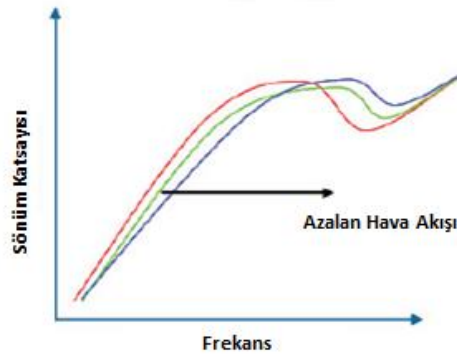
Akustik parametrelerden en başında gelen parametrelerden biri de hava akış direncidir. R_f sembolü ile gösterilen hava akış direnci temel olarak havanın gözenekli malzeme içerisinde maruz kaldığı direnç olarak ifade edilmektedir. Katman kalınlığı d olan gözenekli malzemelerde birim kalınlık için hava akış direnci aşağıdaki denklem 6.1 ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{R_f}{d} \quad (6.1)$$

Ses sönem özelliği iyi olan malzemede hava akış direncinin de bununla doğru orantılı olarak yüksek olduğu görülmektedir. Spesifik hava akış direnci denklem 6.2'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$R_f = \frac{\Delta P}{q} = \frac{TS\Delta P}{v} \text{ N. s. m}^3 \text{ veya Pa. s. m}^{-1} \text{ (MKS rayı)} \quad (6.2)$$

Burada ΔP statik basınç, v kararlı akış hızı, V malzemenin içinden geçen havanın hacmi, T periyot, d katman kalınlığı, S numunenin yüzey alanıdır.



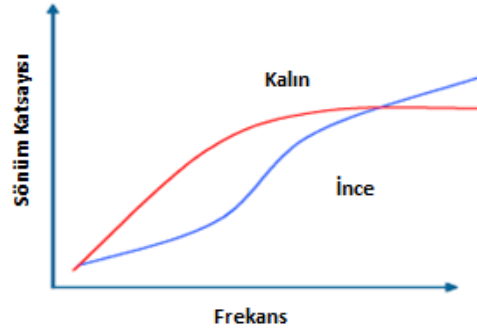
Şekil 5.7 : Hava akış direnci ile ses sönüm katsayısı değişimi [7]

5.5 İç Yapı Dağınlığı

Ses dalgalarının yarattığı basınçla ilerleyen hava partiküllerinin yapı içersinde karmaşık bir yol izlemesinden kasıt malzemenin iç yapı dağınlığıdır. Yutum malzemesinin içinde yol alan akışkan olarak havanın malzemenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçene kadar aldığı karmaşık yol malzemenin iç yapı dağınlığının bir göstergesidir.

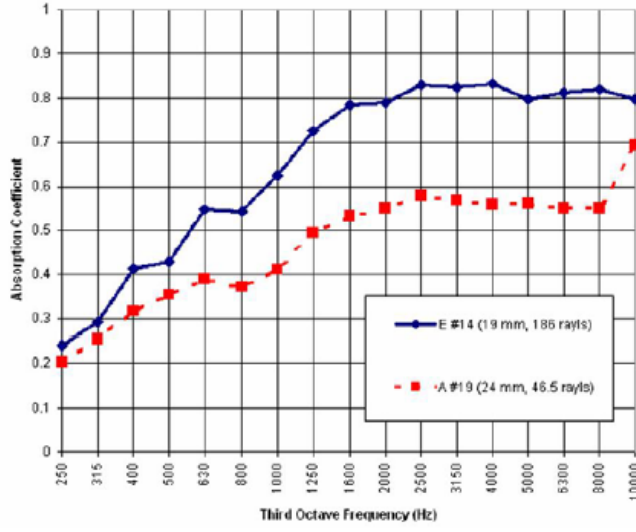
5.6 Kalınlık

Gözenekli yapılarda kalınlık ile düşük frekanslardaki ses yutumu da doğru orantılı olarak artmaktadır. Şekil 5.8’de aynı malzemenin iki farklı kalınlıkta sönümleme kabiliyetini gösteren grafik üzerinden de anlaşılacağı gibi kalınlığı fazla olan sönüm malzemesinin düşük frekanslardaki sönümleme kabiliyeti daha iyidir.



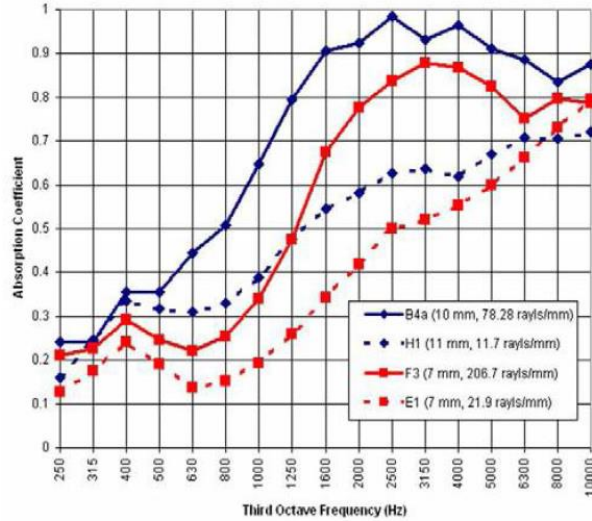
Şekil 5.8 : Kalınlık ile sönüm katsayısı değişimi [7]

Genel olarak kalın malzemelerin ince malzemelere göre ses sönüm katsayılarının daha iyi olduğu söylene de malzemenin diğer özellikleri bu durumu tersine dönüştürecek şekilde etki gösterebilmektedir. Örneğin şekil 5.9’da iki farklı test numunesi ile ses sönüm katsayısı alfa kabin kullanılarak test edilmiş ve sonuçta ince ve hava akış direnci daha yüksek olan malzemenin, kalın ve hava akış direnci düşük olan malzemeye göre daha iyi sönüm kabiliyeti olduğu görülmektedir. Kalınlık tek başına major bir etken olsa da bu çalışmanın sonucunda hava akış direncinin de kalınlık ile birlikte düşünülmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 5.9 : Hava akış direncinin sönüm katsayısı üzerine etkisi [7]

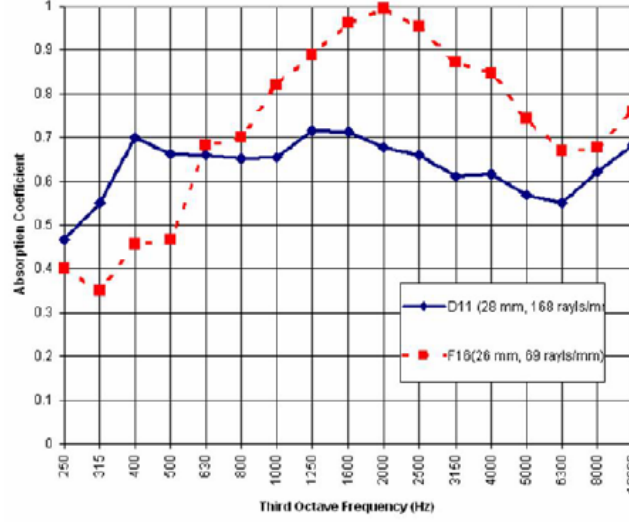
Kalınlığı aynı ya da birbirine çok yakın olarak seçilen şekil 5.10'daki sönüm katsayısı ölçümlerinde ise aynı kalınlığa sahip malzemelerden hava akış direnci yüksek olan malzemenin tüm frekanslarda hava akış direnci düşük olan malzemelere göre daha iyi sönüm kabiliyeti gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.10 : Hava akış direnci ve kalınlığın sönüm katsayısı üzerine etkisi [7]

Benzer bir çalışma olarak şekil 5.11'de kalınlık değerleri birbirine çok yakın fakat hava dirençleri arasındaki farkın çok fazla olduğu numunelerin kullanıldığı sönüm katsayısı ölçüm test sonucuna göre hava akış direncinin yüksek olduğu numunenin

orta ve yüksek frekans aralığında ses sönüm katsayısı hava akış direnci düşük olan malzemeye oranla çok daha iyi olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.11 : Hava akış direncinin sönüm katsayısına etkisi [7]

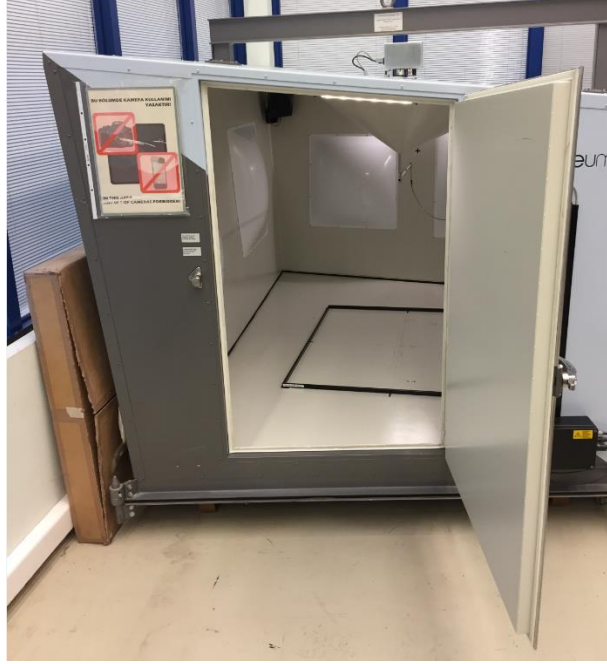
6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Çalışmanın Kapsamı

Çalışmanın deneysel analiz kısmında farklı malzeme özelliklerine göre hazırlanmış numuneler ile akustik parametre ölçüm yöntemlerinden alfa kabin test metodu kullanılarak malzeme özelliklerinin akustik parametrelere etkisi incelenecek ve farklı malzeme özellikleri karşılaştırılacaktır. Ayrıca malzemelere ait maliyetler referans değerler üzerinden farklı kalınlıklar için yaklaşık olarak hesaplanmış ve kalınlık artışına bağlı olarak malzeme maliyetlerindeki artışa bağlı olarak sönüm katsayısının değişimi oransal olarak incelenerek sonuçları paylaşılacaktır.

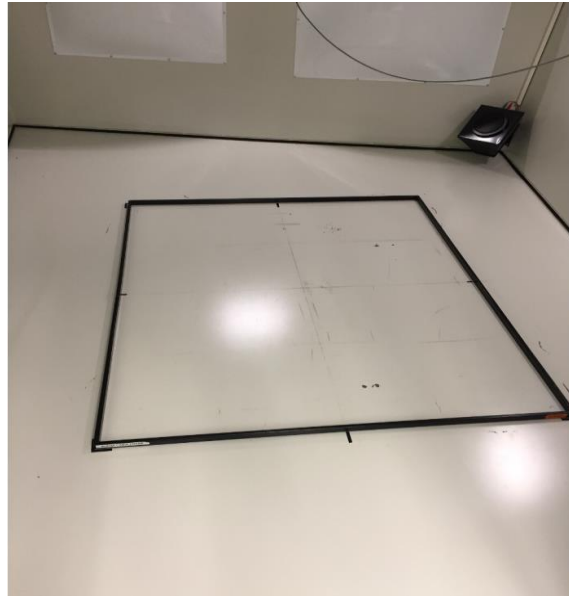
6.2 Test Düzenine Tanıtılması

Çalışmanın deneysel kısmında Autoneum firmasına ait alfa kabin test sistemi kullanılmıştır. Alfa kabin hacimleri standart olup test sisteminde kullanılan alfa kabinin hacmi 6.44 m^3 ve kullanılan numunelerin standart yüzey alanları 1.2 m^2 olacak şekilde seçilmiştir. Alfa kabinler sonuçların sağlıklı olması açısından çalışma aralığı olarak 400Hz ile 10000 Hz frekans aralığında otomotiv endüstrisinin ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde üretilmektedir. Şekil 6.1'de Autoneum firmasına ait alfa kabin gösterilmektedir.



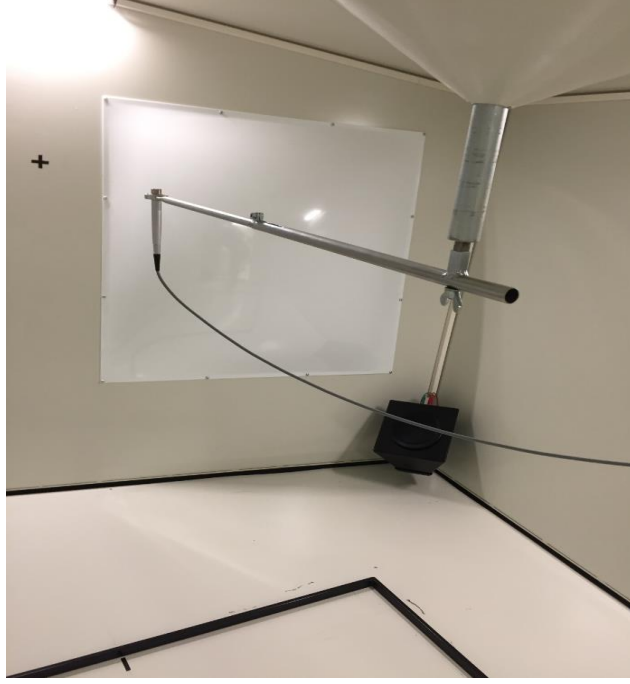
Şekil 6.1 : Alfa kabin

Düz katman halindeki malzemeler Şekil 6.2’de gösterildiği gibi alfa kabinin merkezine yerleştirilmiş olan 1.2 m² ‘lik çerçeve içersine yerleştirilmektedir. Proje çalışmaları sırasında formlu ve ebatları 1.2 m² ‘den büyük ya da küçük olan parçaların ölçümleri de çerçeve kullanılmadan yapılabilmektedir.



Şekil 6.2 : Alfa kabin test çerçevesi

Alfa kabin içerisinde ölçüm sırasında tahrik şekil 6.3’de görülen köşelere yerleştirilmiş hoparlörler tarafından verilmekte ve ses basıncı çerçevenin hemen üzerinde bulunan mikrofonlar aracılığıyla ölçülmektedir.



Şekil 6.3 : Alfa kabin mikrofon düzeneği

Alfa kabine ait teknik katalog bilgisi çizelge 6.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 : Alfa kabin teknik özellikler

Akustik Özellikler	
Ölçülebilir Numune Boyutları	1.0 x 1.2 m
Ölçülebilir Numune Yüzey Alanı	0.6 – 2.4 m ²
Ölçülebilir frekans aralığı	0.4 – 10 kHz
Akustik Tahrik	3 Hoparlör, 50 W
Mikrofon Tipi	ICP
Kabin Hacmi	6.44 m ³
İç yüzey alanı	22.6 m ²
Kabin Boyutları (Boy x En x Yükseklik)	3.22 x 2.37 x 2.03 m
Kabin toplam ağırlığı	1680 kg

6.3 Numunelerin Tanıtılması

Deneysel çalışma sırasında test edilen malzemelere ait özellikler çizelge 6.1’de gösterildiği gibidir. Çalışmanın yapıldığı ortam şartları 25°C sıcaklık ve yaklaşık %9 nem oranında sabit tutulmaya çalışılmıştır. Sönüm için kullanılan malzemelerin yüzey alanı 1.2 m² olarak alfa kabin standart numune yüzey alanıdır.

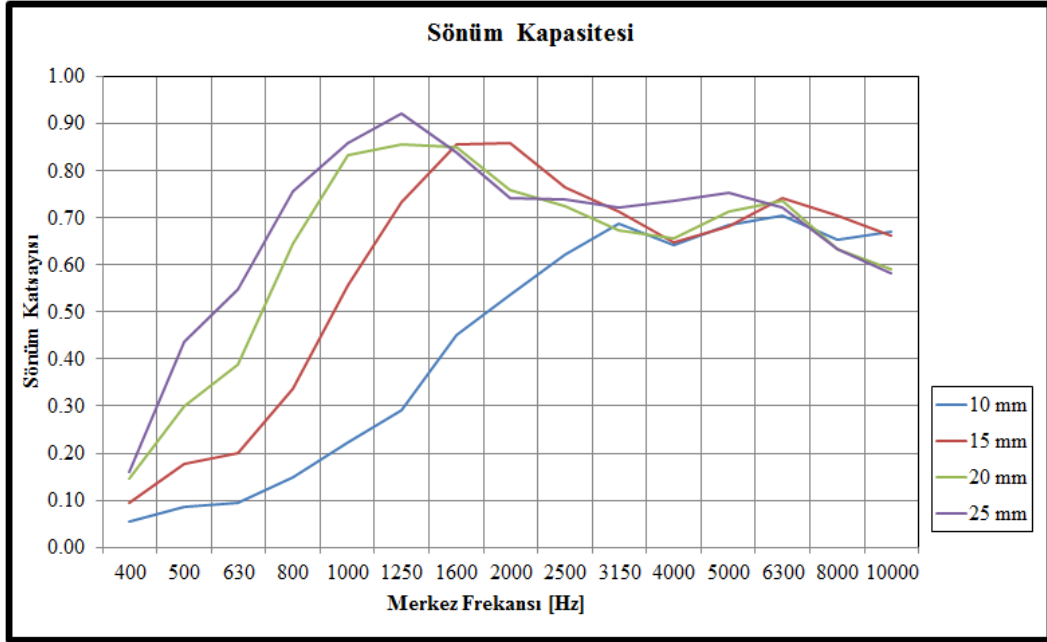
Çizelge 6.2 : Alfa kabin ölçüm numuneleri ve malzeme özellikleri

Malzeme	Yüzey Yoğunluğu [gr/m ²]	Kalınlık [mm]
Poliüretan sünger (PU)	150	10,15,20,25
Polipropilen köpük (PP)	200	10,15,20
Koton keçe	800	10,15,20

6.4 Alfa Kabin Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneysel çalışmanın ilk kısmında tüm malzemelerin farklı kalınlıklarda sönüm katsayıları ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Genel olarak ifade etmek gerekir ise tüm malzemelerde kalınlık artışına bağlı olarak sönüm katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.4’de Poliüretan sünger (PP) malzemeye ait 10, 15, 20 ve 25 mm kalınlıklara ait sönüm katsayısı ölçümleri gösterilmektedir. Kalınlığı fazla olan numunelerin düşük frekanslardaki ses sönüm kabiliyetlerinin düşük kalınlıktakilere oranla çok daha iyi olduğu görülmüştür. Poliüretan sünger malzeme için 1000 – 1250 Hz frekans bandına kadar kalınlığa bağlı olarak bu farkın çok daha net gözlemlenebildiği bu frekanstan sonraki frekanslarda ise malzemelerin benzer sönüm kabiliyetlerine sahip oldukları gözlemlenmiştir.



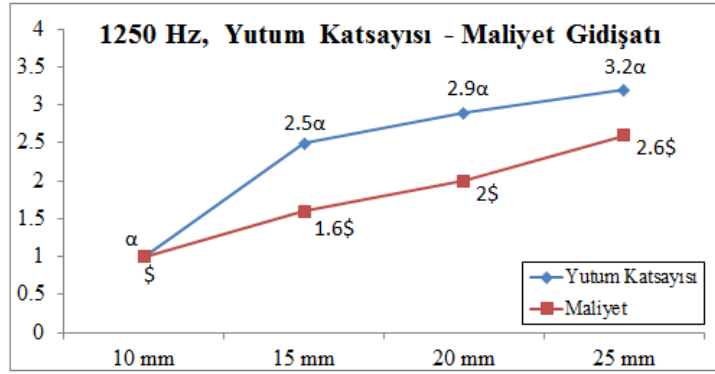
Şekil 6.4 : Poliüretan sünger ses sönüm katsayısı – kalınlık değişimi

Ölçüm sonuçlarına ait sayısal değerleri çizelge 6.3’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 6.3 : Poliüretan (PU) sünger alfa kabin ölçüm sonuçları

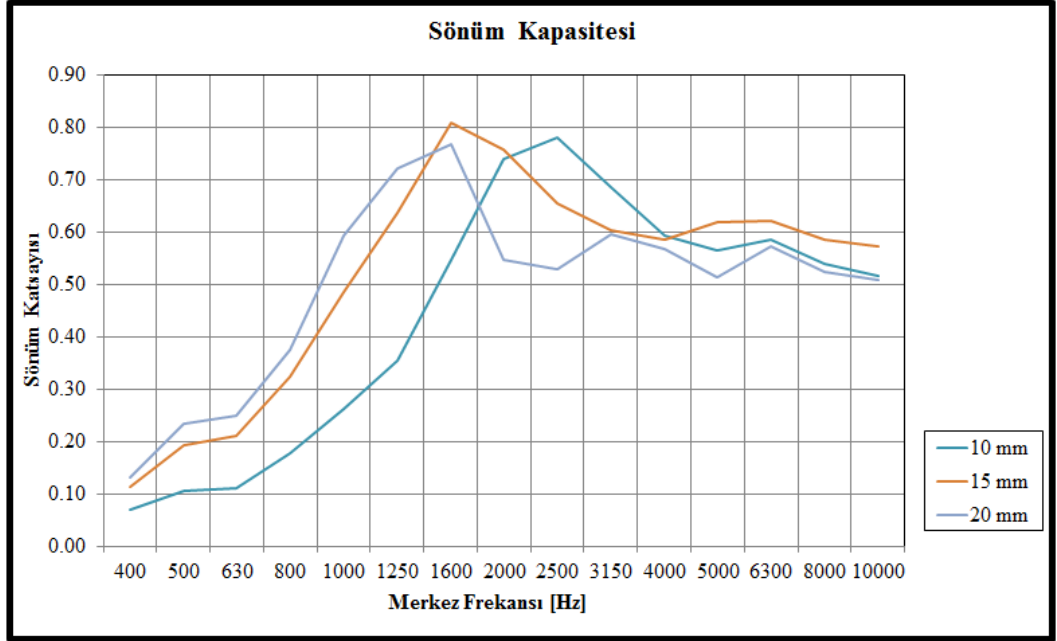
Merkez Frekans [Hz]	10 mm Kalınlık	15 mm Kalınlık	20 mm Kalınlık	25 mm Kalınlık
400	0.06	0.09	0.15	0.16
500	0.09	0.18	0.30	0.44
630	0.09	0.20	0.39	0.55
800	0.15	0.34	0.64	0.75
1000	0.22	0.56	0.83	0.86
1250	0.29	0.73	0.86	0.92
1600	0.45	0.85	0.85	0.84
2000	0.54	0.86	0.76	0.74
2500	0.62	0.76	0.72	0.74
3150	0.69	0.71	0.67	0.72
4000	0.64	0.65	0.65	0.73
5000	0.68	0.68	0.71	0.75
6300	0.70	0.74	0.74	0.72
8000	0.65	0.70	0.63	0.63
10000	0.67	0.66	0.59	0.58

Şekil 6.5’de malzemenin kalınlık artışına bağı olarak sönüm katsayısı ve malzeme maliyeti arasındaki ilişki verilmiştir. Tüm kalınlık değerleri için ortak bir kıyaslama yapabilmek için her kalınlık değeri için sönüm katsayısının maksimum değere ulaştığı ortak bir frekans analiz için baz alınmıştır. 1250 Hz için kalınlık değeri 10 mm’den 15 mm’ye çıkarıldığında sönüm katsayısının 2.5 kat arttığı, malzeme maliyetinin ise 1.6 kat arttığı görülmüştür. Bundan sonraki 20 mm ve 25 mm değerleri için sönüm katsayısı ile maliyet arasındaki ilişki benzer şekilde değişmektedir.



Şekil 6.5 : Poliüretan (PU) malzemenin kalınlığına bağı olarak yutum katsayısı ve maliyet arasındaki ilişki

Şekil 6.6’de ise polipropilen malzemenin 10,15 ve 20 mm kalınlıktaki numunelerine ait sönüm katsayısı ölçüm sonuçları görülebilmektedir. Poliüretan malzemeye benzer olarak polipropilen malzemede kalınlık artışına bağı olarak özellikle 1250 – 1600 Hz frekans bandında kalınlığı fazla olan numunelerinin kalınlığı az olan numunelere göre daha iyi sönüm kabiliyeti olduğu söylenebilir. Yüksek frekanslarda ise sönüm katsayısının kalınlığa göre fazla değişmediği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6 : Polipropilen ses sönüm katsayısı – kalınlık değişimi

Ölçüm sonuçlarına ait sayısal değerleri çizelge 6.4’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 6.4 : Polipropilen (PP) köpük alfa kabin ölçüm sonuçları

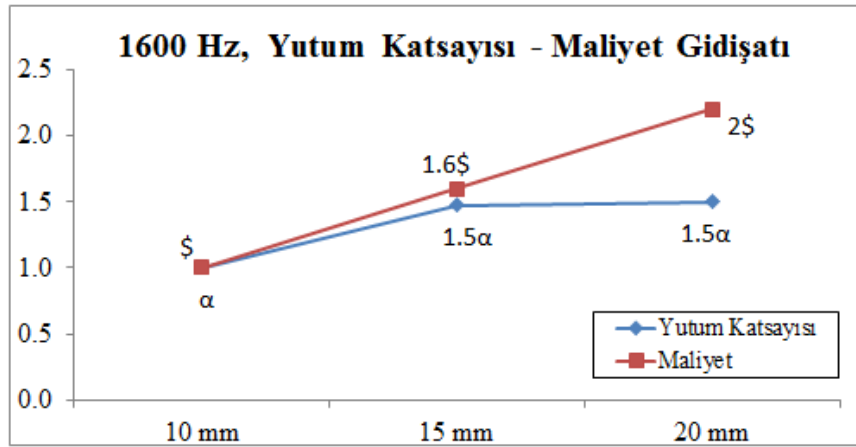
Merkez Frekans [Hz]	10 mm Kalınlık	15 mm Kalınlık	20 mm Kalınlık
400	0.07	0.11	0.13
500	0.11	0.19	0.23
630	0.11	0.21	0.25
800	0.18	0.32	0.37
1000	0.26	0.48	0.59
1250	0.36	0.64	0.72
1600	0.55	0.81	0.77
2000	0.74	0.76	0.55
2500	0.78	0.66	0.53
3150	0.69	0.60	0.60

Çizelge 6.4 (devam) : Polipropilen (PP) köpük alfa kabin ölçüm sonuçları

Merkez Frekans [Hz]	10 mm Kalınlık	15 mm Kalınlık	20 mm Kalınlık
4000	0.59	0.58	0.57

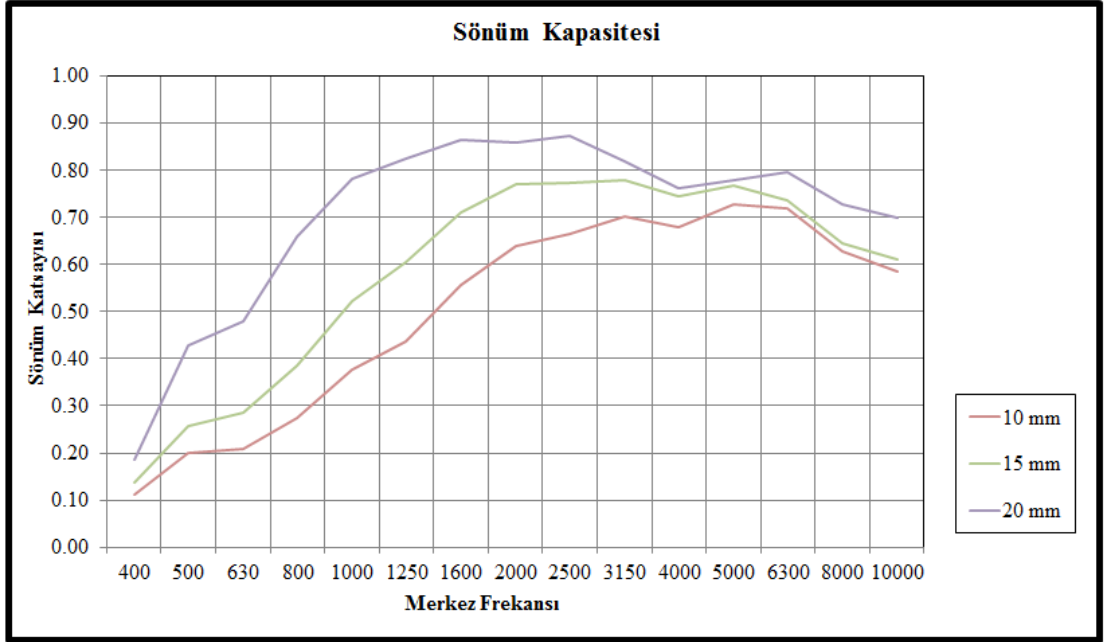
5000	0.57	0.62	0.51
6300	0.59	0.62	0.57
8000	0.54	0.58	0.52
10000	0.52	0.57	0.51

Şekil 6.7’de malzemenin kalınlık artışına bağlı olarak sönüm katsayısı ve malzeme maliyeti arasındaki ilişki verilmiştir. Tüm kalınlık değerleri için ortak bir kıyaslama yapabilmek için her kalınlık değeri için sönüm katsayısının maksimum değere ulaştığı ortak bir frekans analiz için baz alınmıştır. 1600 Hz için kalınlık değeri 10 mm’den 15 mm’ye çıkarıldığında sönüm katsayısının ve malzeme maliyetinin benzer şekilde ortalama 1.5 kat artarak yükseldiği, kalınlığın 15 mm’den 20 mm’ye yükseldiği durumda ise sönüm katsayısının aynı kaldığı fakat maliyetin yaklaşık 1.25 kat arttığı görülmektedir.



Şekil 6.7 : Polipropilen (PP) köpük malzemenin kalınlığına bağlı olarak yutum katsayısı ve maliyet arasındaki ilişki

Şekil 6.8’de Koton keçe malzemeye ait farklı kalınlıklardaki ses sönüm katsayısı ölçüm sonuçları görülebilmektedir. 1500 – 2200 Hz bandında kalınlık artışına bağlı olarak sönüm katsayıları arasında kalınlığı fazla olan numunelerin sönüm kabiliyetlerinin diğerlerine nazaran çok daha iyi olduğu, yüksek frekanslarda ise tüm numunelerin benzer sönüm özellikleri gösterdikleri görülmektedir.



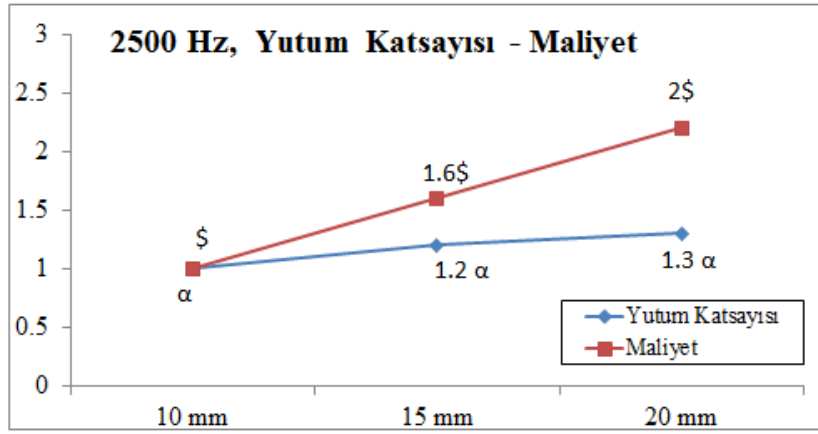
Şekil 6.8 : Koton keçe ses sönüm katsayısı – kalınlık değişimi

Ölçüm sonuçlarına ait sayısal değerleri çizelge 6.5’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 6.5 : Koton keçe alfa kabin ölçüm sonuçları

Merkez Frekans [Hz]	10 mm Kalınlık	15 mm Kalınlık	20 mm Kalınlık
400	0.11	0.14	0.19
500	0.20	0.26	0.43
630	0.21	0.28	0.48
800	0.27	0.39	0.66
1000	0.38	0.52	0.78
1250	0.44	0.60	0.82
1600	0.56	0.71	0.86
2000	0.64	0.77	0.86
2500	0.67	0.77	0.87
3150	0.70	0.78	0.82
4000	0.68	0.75	0.76
5000	0.73	0.77	0.78
6300	0.72	0.73	0.79
8000	0.63	0.64	0.73
10000	0.59	0.61	0.70

Şekil 6.9’da malzemenin kalınlık artışına bağılı olarak sönüm katsayısı ve malzeme maliyeti arasındaki ilişki verilmiştir. Tüm kalınlık değerleri için ortak bir kıyaslama yapabilmek için her kalınlık değeri için sönüm katsayısının maksimum değere ulaştığı ortak bir frekans analiz için baz alınmıştır. 2500 Hz için kalınlık değerlerinde artışa bağılı olarak sönüm katsayısındaki değişimin maliyet değişiminin altında kaldığı ve maliyetin 2 kat arttığı durumda sönüm katsayısındaki değişimin 1.3 kat olduğu görülmektedir.

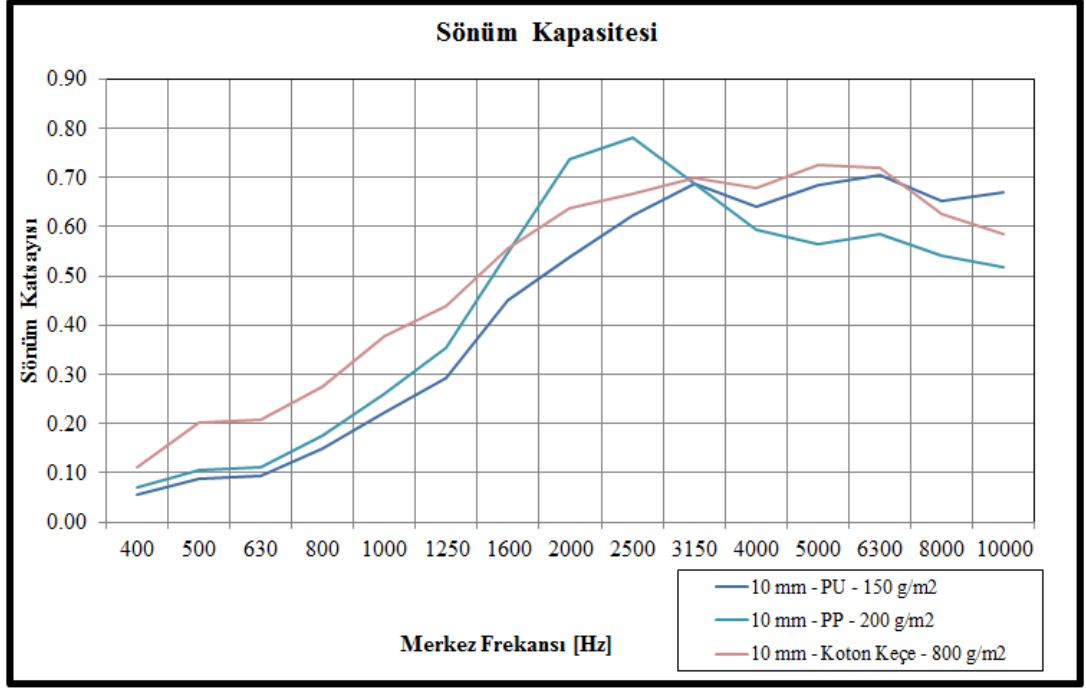


Şekil 6.9 : Koton keçe malzemenin kalınlığına bağılı olarak yutum katsayısı ve maliyet arasındaki ilişki

Numunelerin kalınlıkları aynı tutularak malzeme ve yüzey yoğunluğu değişkenliğine bağılı olarak sönüm katsayısının değişimi izlendiğinde tüm kalınlıklarda frekans değerleri arttıkça malzemelerin sönüm katsayılarının da arttığı ve belli bir değerde pik yaptığı görülmüştür. Yüksek frekanslarda ise tüm malzemelerin sönüm katsayılarında bir miktar düşüşle birlikte sonraki gidişatın benzer şekilde olduğu görülmektedir.

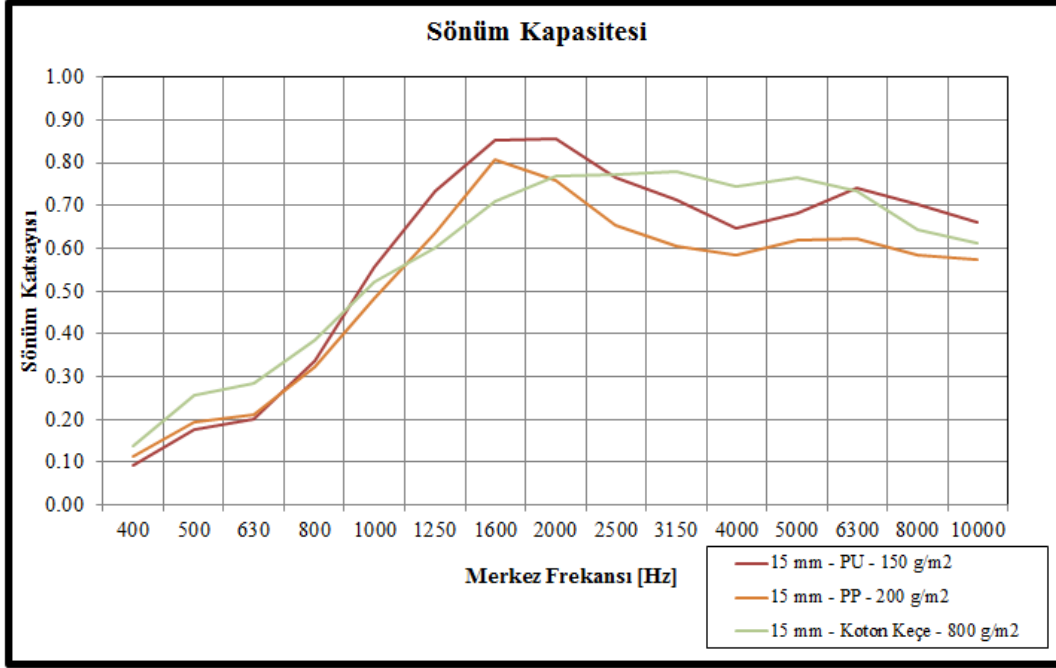
Şekil 6.10’de 10 mm kalınlık için poliüretan (150 g/m^3), polipropilen (200 g/m^3) ve Koton keçe malzeme (800 g/m^3) ‘nin sönüm katsayısındaki değişim gösterilmiştir. Yoğunluğu fazla olan keçe malzemenin (400 – 1200 Hz) ve (3500 – 5500 Hz)

frekans aralığında diğerlerine göre daha yüksek sönüm katsayısına sahip olduğu görülmektedir.



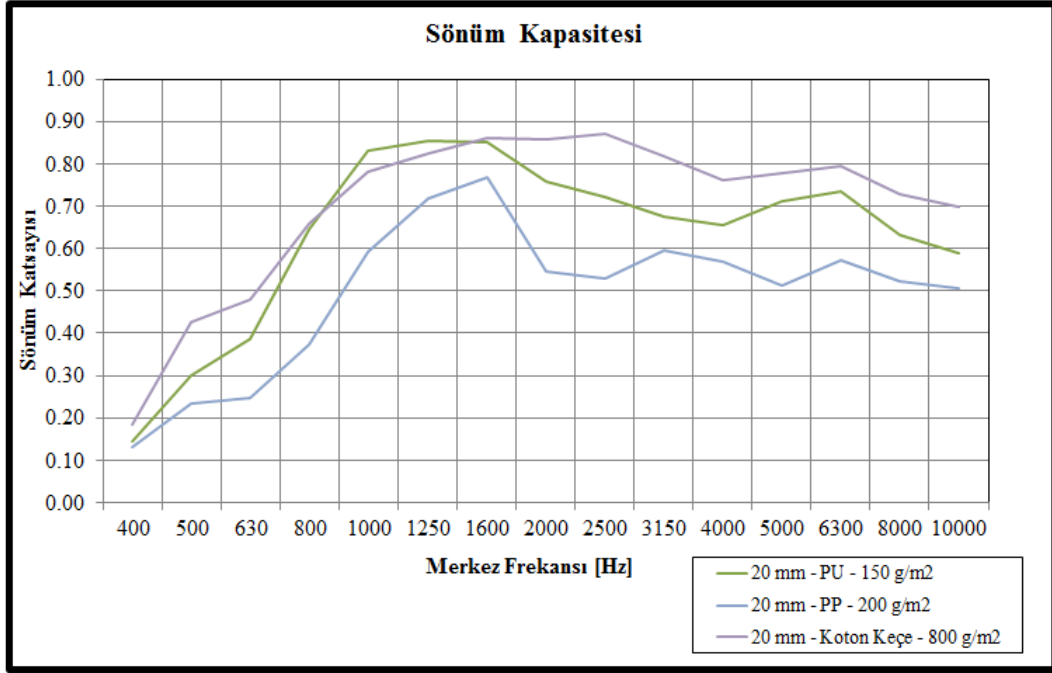
Şekil 6.10 : 10 mm kalınlık / ses sönüm katsayısı – yoğunluk değişimi

Şekil 6.11’de 15 mm kalınlık için poliüretan (150 g/m^3), polipropilen (200 g/m^3) ve Koton keçe malzeme (800 g/m^3) ‘nin sönüm katsayısındaki değişim gösterilmiştir. Yoğunluğu fazla olan keçe malzemenin (400 – 900 Hz) ve (2500 – 5500 Hz) frekans aralığında diğerlerine göre daha yüksek sönüm katsayısına sahip olduğu görülmektedir.



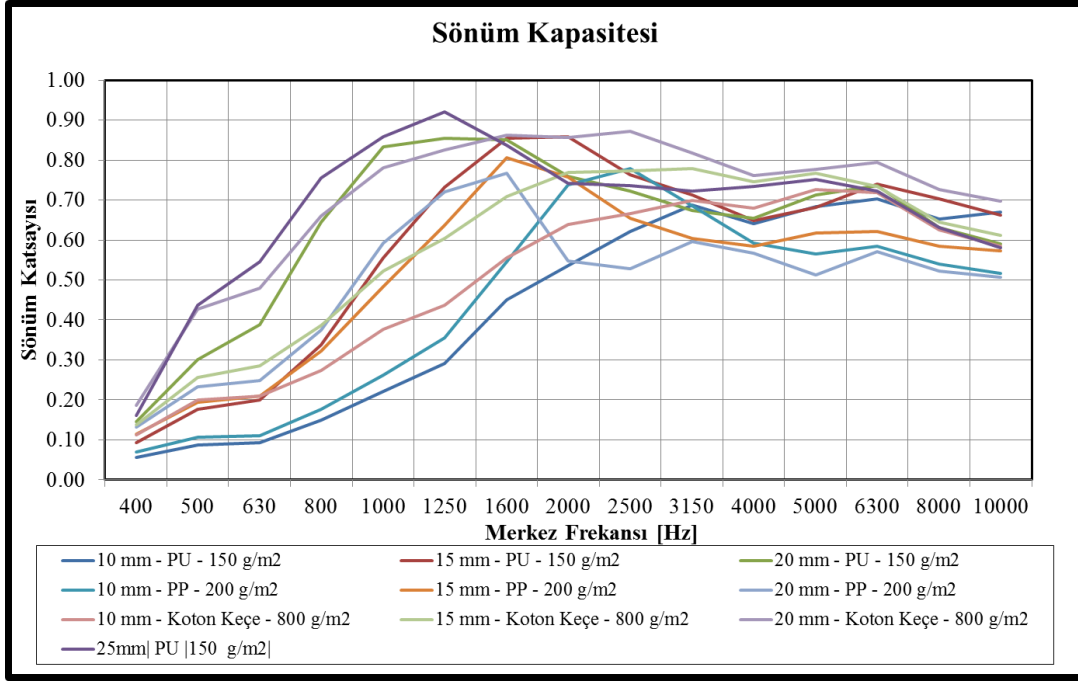
Şekil 6.11 : 15 mm kalınlık / ses sönüm katsayısı – yoğunluk değişimi

Şekil 6.12’de 20 mm kalınlık için poliüretan (150 g/m^3), polipropilen (200 g/m^3) ve Koton keçe malzeme (800 g/m^3) ‘nin sönüm katsayısındaki değişim gösterilmiştir. Yoğunluğu fazla olan keçe malzemenin (400 – 900 Hz) ve (1600 – 4000 Hz) frekans aralığında diğerlerine göre daha yüksek sönüm katsayısına sahip olduğu görülmektedir.



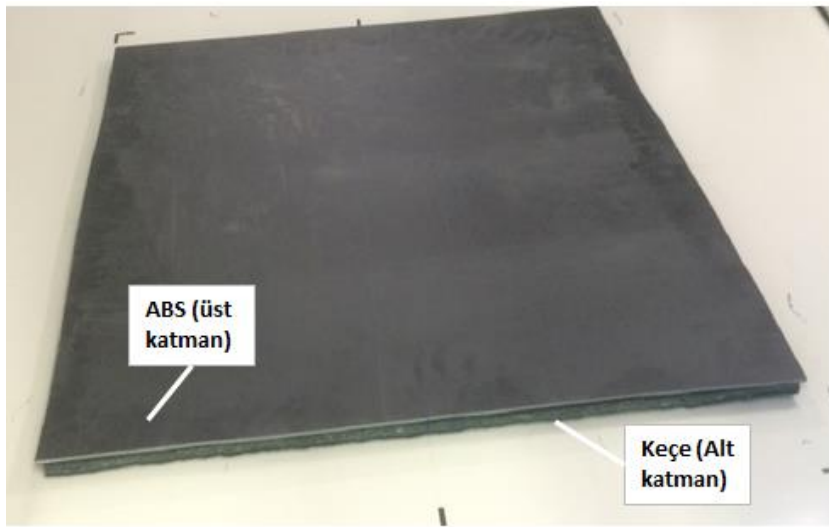
Şekil 6.12 : 20 mm kalınlık / ses sönüm - yoğunluk değişimi

Sonuç olarak şekil 6.13’de tüm numunelerin sönüm kabiliyetleri karşılaştırılması sonucunda düşük ve orta frekans aralığında 25 mm kalınlık ve 150 g/m² yoğunluğa sahip poliüretan malzemenin daha iyi sonuç verdiği, yüksek frekans aralığında ise 20 mm kalınlığa ve 800 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip Koton keçe malzemenin diğer malzemelere göre daha iyi ses sönüm kabiliyeti gösterdiği anlaşılmaktadır. Düşük frekanslar için kalınlık aynı olduğu şartlarda ise yine aynı şekilde 20 mm kalınlığa ve 800 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip Koton keçe malzemenin diğer malzemelere göre ses sönüm kabiliyetinin daha iyi olduğu görülmektedir.



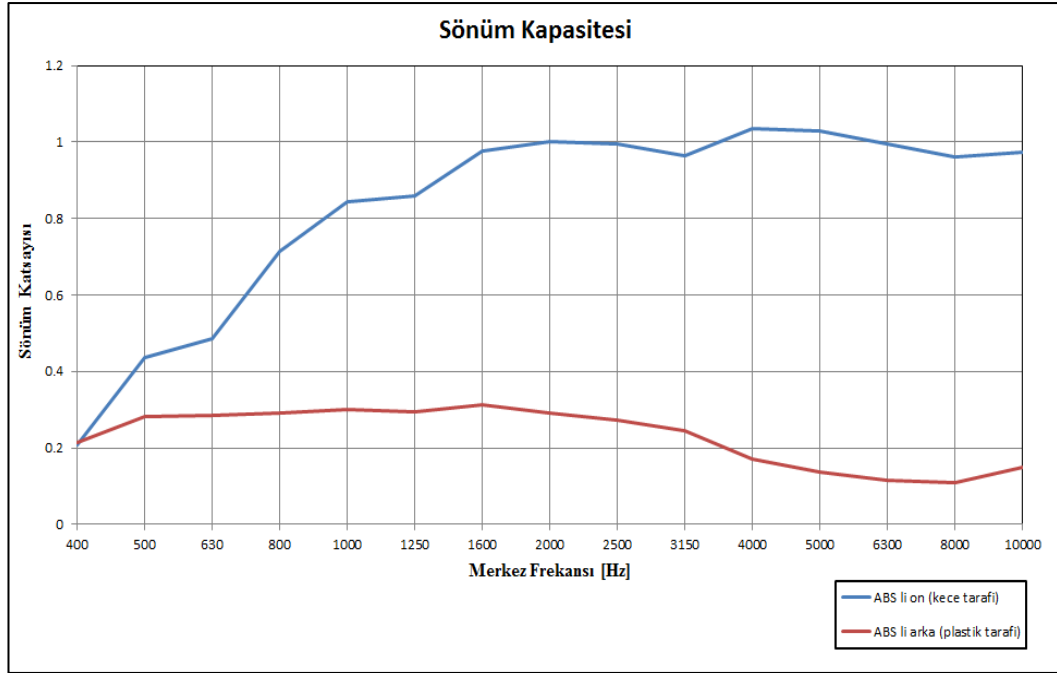
Şekil 6.13 : Tüm numunelerin sönüm katsayısı karşılaştırma tablosu

Çalışmanın devamında ise şekil 6.14'deki araçlarda taban kaplaması olarak kullanılan üst tarafı ABS plastik malzemeden yapılmış ve alt tarafı keçe ile kaplanmış parçanın alfa kabinde birincisi ABS malzeme üstte ikincisi ise keçe tarafı üstte olacak şekilde iki kez ölçüm yapılmıştır.



Şekil 6.14 : Araç taban halısı malzeme örneği (ABS+Koton keçe)

Şekil 6.15’da gösterildiği gibi sonuç olarak ABS plastik ile keçe malzemenin sönüm katsayıları arasında ciddi bir fark olduğu ses sönüm kabiliyeti açısından keçe malzemenin ABS malzemeye göre çok daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 6.15 : Taban halısı ABS ve keçe tarafı alfa kabin ölçüm sonuçları

7. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemeler ve uygulama alanları, araçlarda akustik etkiyi yaratan etkenler ve akustik özelliklere etki eden malzeme özelliklerinin yanında bu özelliklerin ürün geliştirme çalışmaları kapsamında test metodlarının incelenmesi yapılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan akustik parametre ölçüm yöntemleri büyük otomotiv üreticileri tarafından akustik malzemelerin test edilmesinde sürekli kullanılan yöntemlerdir. Özellikle alfa kabin ölçümleri hem ölçüm proses süresinin kısa olması hem de numunelerin kolay hazırlanmasından dolayı diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedir.

Çalışmanın deneysel kısmında alfa kabin test metodu kullanılarak akustik performansa etki eden özelliklerden kalınlık ve malzeme yüzey yoğunluğunun akustik parametrelere olan etkisi incelenmiş ve bu kapsamda incelenmek üzere üç farklı malzeme sırasıyla poliüretan sünger, polipropilen köpük ve koton keçe seçilmiştir. Sonuç olarak malzemelerin kalınlıkları arttıkça özellikle düşük frekans bandında malzemelerin ses sönüm kabiliyetlerinin gözle görülür oranda arttığı ve yüksek frekans aralıklarında ise benzer özellikler taşıdığı görülmüştür. Çalışmanın ikinci kısmında yürütülen kalınlıkların sabit tutularak malzemenin farklı yüzey yoğunluklarındaki sönüm kabiliyetlerinin yoğunluğa bağlı olarak düşük ve yüksek frekans aralıklarında yoğunluğu düşük olan malzemelere oranla daha yüksek sönüm kabiliyeti gösterdiği görülmüştür. Çalışma sonucunda teorik kısımda ele alınan sönüm katsayısına etki eden malzeme özelliklerinin deneysel olarak alfa kabin test sonuçlarıyla uyumlu olduğu deneyimlenmiştir.

Ayrıca malzemelere ait maliyetler referans değerler üzerinden farklı kalınlıklar için yaklaşık değerler olacak şekilde oransal olarak hesaplanmış ve kalınlık artışına bağlı olarak malzeme maliyetlerindeki artışa bağlı olarak sönüm katsayısının değişimi oransal olarak incelenmiştir. Poliüretan (PU) sünger için 1250 Hz frekans değerinde kalınlık değeri 10 mm'den 15 mm'ye çıkarıldığında sönüm katsayısının 2.5 kat arttığı, malzeme maliyetinin ise 1.6 kat arttığı görülmüştür. Bundan sonraki 20 mm

ve 25 mm değerleri için sönüm katsayısı ile maliyet arasındaki ilişki benzer şekilde değiştii gözlemlenmiştir. Polipropilen (PP) köpük malzeme için ise 1600 Hz frekans değerinde kalınlık değeri 10 mm'den 15 mm'ye çıkarıldığında sönüm katsayısının ve malzeme maliyetinin benzer şekilde ortalama 1.5 kat artarak yükseldii, kalınlığın 15 mm'den 20 mm'ye yükseldii durumda ise sönüm katsayısının aynı kaldığı fakat maliyetin yaklaşık 1.25 kat arttığı görölmektedir. Artık ipliklerden üretilmiş olan koton keçe malzemede ise 2500 Hz frekans değeri için kalınlık değerlerinde artışa bağlı olarak sönüm katsayısındaki değişimin maliyet değişiminin altında kaldığı ve maliyetin 2 kat arttığı durumda sönüm katsayısındaki değişimin 1.3 kat olduğu görölmektedir.

Bu tez sonucunda sönüm malzemelerinin akustik performanslarının kalınlık, yoğunluk, hava akış geçirgenliği gibi bir çok özelliğine bağlı olarak değişmekte olduğu hem teorik hem de deneysel çalışma sonucunda görölmüştür. Araç akustik paket tasarımlarında ihtiyaç duyulan frekans aralığı için doğru parametrelere sahip sönüm malzemelerinin seçilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur. Son olarak ise sönüm malzemesindeki kalınlık artışına bağlı malzeme maliyetindeki artışın, malzemenin akustik performansı ile karşılaştırılarak fiyat ve performans açısından uygun parametrelerin seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Özgülven, N.** (1986) Endüstriyel Gürültü Kontrolü, TMMOB Yayın No: 118, Ankara, Türkiye.
- [2] **Uzundağ, U. ve Tandoğan, O.** (2013). Malzemelerin akustik performans testleri raporu. İstanbul: Novasim Mühendislik Raporu.
- [3] **Cox, T. J., and D'Antonio, P.,** (2005) Acoustic Absorbers and diffusers, Spon Press, London and New York, UK and USA.
- [4] **T.Bein, J,BOS D. Mayer,** (2004), Advanced materials and technologies for reducing noise, vibration and harshness (NVH) in automobiles, Fraunhofer Institute For Structural Durability and System Durability and System Reliability LBF, Germany.
- [5] **D, Vige.** (2010) Vehicle interior noise refinement – cabin sound package design and development, Centro Ricerche Fiat, Italy.
- [6] **Zent A. and John, T. L.,** (2007), Automotive sound absorbing material survey results. Society of Automotive Engineering Noise and Vibration Conference and Exhibition, Illinois, USA, May 14-17.
- [7] **Bilova M. and Lumnitzer, E.,** (2011), Advanced techniques used for acoustical parameters determination of sound absorbers, Kosice Technical University , Slovakia.
- [8] **Skinner, C., Peters, J., and Vandenbroeck, J,** (2006), Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles, International Urethanes Technology Exhibition and Conference UTECH Europe, Netherlands, March 30.
- [9] **S. Seddeq, H.,** (2009), Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials, Housing and building research center, Acoustic Department , Egypt.
- [10] **Nemecek, P.,** (2014), Sound absorption material in alfa cabin, Modern methods of construction design lecture notes in mechanical engineering, Technical University of Liberec,, Czech Republic.
- [11] **Ancuta, E.,** (2014), The analysis of factors that influence the sound absorption coefficient of porous materials, Department Environmental Engineering and Sustainable Development Entrepreneurship,, Technical University of Cluj-Napoca, Romania.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mustafa Gelen
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.02.1989 - Mihalıççık
E-posta : gelenmustafa@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği