
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR ISI-SES YALITIM MALZEMESİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

Mehmet Ali ARSLAN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2018

Mehmet Ali ARSLAN tarafından hazırlanan "ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR ISI-SES YALITIM MALZEMESİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..……..

Başkan: Prof. Dr. Kamil SAÇILIK

Tarım Makineleri Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..……..

Üye: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..……..

Üye: Doç. Dr. Engin GEDİK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..……..

Üye: Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..……..

Tez Savunma Tarihi: 25/06/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

...……..……..

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Ali ARSLAN

25/06/2018

ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR ISI-SES YALITIM MALZEMESİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Mehmet Ali ARSLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Yalıtım malzemeleri, pasif gürültü kontrolü ve ısı-ses yalıtımı ile ilgili artan ihtiyaçlar nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte farklı ortamlarda istenen ısıl, akustik performans ve konfor şartlarını sağlayan ısı-ses yalıtım malzemeleri geliştirilmesine yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen Al esaslı metalik köpüklerin ısı ve ses yalıtım özellikleri hakkında sağlıklı ve yeterli araştırma sayısı çok azdır. Yapılan çalışma ile son yıllarda oldukça ilgi çekmekte olan Al esaslı metalik köpüklerin iyi bir ısı ve ses yalıtımı sağlayacak nitelikte üretimi ve karekterizasyonu üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda tez çalışmasında farklı ortamlarda istenen ısıl ve akustik performans sağlayacak şekillendirilebilir Al esaslı metalik köpük üretilmiştir. Farklı gözenek yapısı ve boyutlarda üretilen kapalı gözenekli Al esaslı köpüklerin mikro ve makro yapıları analiz edilmiş, optimum üretim parametreleri belirlenerek üretilen köpüklerin ısı iletim katsayısı, frekansa bağlı ses yutum katsayısı ve iletim kaybı özellikleri ASTM E1530-11 ve TS EN ISO 10534-2 standartlarına göre deneysel olarak analiz edilmiştir. Üretilen Al esaslı köpükler ile yapılan testlerden elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri 1,2-4,11 W/mK arasında değişmektedir. Bütün deney numuneleri arasında tip 6 Al köpük 500 Hz ve üzeri frekans bandında çok iyi ses yutum performansı göstermiş ve tip 6 için en yüksek ses yutum katsayısı 630 Hz'de 0,98 olarak ölçülmüştür. Ayrıca tip 4 özellikle 800 Hz ile 6300 Hz frekans aralığında 20 dB ve 40 dB arasında gürültüyü azaltarak ses yalıtımı ve gürültü kontrolü açısından çok iyi bir performans göstermiştir. Yapılan bu tez çalışmasından edilen verilere göre, Al esaslı köpüklerin hem ısıl hem de akustik özellikleri açısından farklı alanlarda fonksiyonel uygulamalar için önemli bir kullanım potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 92807

Anahtar Kelimeler : Kapalı gözenekli alüminyum köpük, ısı yalıtımı, ses yalıtımı, ses yutumu

Sayfa Adedi : 188

Danışman : Prof. Dr. MustafaAKTAŞ

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF FORMABLE HEAT-SOUND INSULATION MATERIAL

(Ph. D. Thesis)

Mehmet Ali ARSLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2018

ABSTRACT

Insulation materials are widely used in many areas due to the increased requirements for passive noise control and heat-sound insulation. However, studies to develop heat-sound insulation materials that provide the desired thermal, acoustic performance and comfort conditions in different environments have gained importance. The number of healthy and sufficient research on the thermal and sound insulation properties of Al-based metallic foams, which can find use in various engineering applications, is too little. An experimental research has been carried out on the production and characterization of Al-based metallic foams, which have been attracting much attention in recent years, in order to provide good heat and sound insulation. In this context, Al-based metallic foam is produced which can provide the desired thermal and acoustical performance in different environments. Micro and macro structures of closed-cell Al based foams produced in different pore structure and sizes were analyzed and optimum production parameters were determined and the thermal conductivity, frequency dependent sound absorption coefficient and transmission loss properties of the produced foams were determined according to ASTM E1530-11 and TS EN ISO 10534-2 standards were analyzed experimentally. The values of thermal conductivity obtained from the tests made with the produced Al based foams vary between 1,2-4,11 W/mK. Among all test samples, type 6 Al foam has exhibited good sound absorption performance in the frequency band of 500 Hz and above, and the highest sound absorption coefficient for type 6 was measured as 0.98 at 630 Hz. In addition, type 4 has shown very good performance in terms of sound isolation and noise control, especially by reducing noise between 20 dB and 40 dB in the 800 Hz to 6300 Hz frequency range. According to the data obtained from this thesis study, it was determined that Al-based foams have an important usage potential for functional applications in different areas in terms of both thermal and acoustic properties.

Science Code : 92807

Key Words : Closed-cell aluminum foam, heat insulation, sound insulation, sound absorption

Page Number : 188

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım tez izleme komitesi üyeleri hocam Prof. Dr. Adem ACIR ve Doç.Dr. Gökhan DURMUŞ'a, ayrıca başta Dr. Öğr. Üyesi Hanefi ÇİNİCİ olmak üzere Metalurji Malzeme Muhendisliği öğretim üyelerine, deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Gültekin UZUN, Arş. Gör. Görkem KIRMIZI, Arş. Gör. Ömer BAYRAKTAR, Salih TERYAKA, Ekin Can DOLGUN ve "TSE" Akustik Uzmanı Fatih ÖZTÜRK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca 07/2017-11 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan sevgili eşim Hatice ARSLAN'a gösterdiği sabır, anlayış ve fedakârlıklarından dolayı çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİNLİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 7

2.1. Isı-Ses Yalıtımı ve Gürültü Kontrolü 7

2.1.1. Isı yalıtımı ile ilgili tanım ve kavramlar 7

2.1.2. Isı yalıtımının mekanizması 10

2.1.3. Yalıtım malzemelerinin ısıl özellikleri ve standartlar 11

2.1.4. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler 12

2.1.5. Ses yalıtımı ve gürültü kontrolü 17

2.1.6. Ses ile ilgili fiziksel olaylar 17

2.1.7. Akustik malzemelerin kullanımı ve özellikleri 25

2.1.8. Gözenekli ortamda akustik performansa etki eden temel özellikler 28

2.2. Gözenekli Ortamın Isı İletim Katsayısı 33

2.2.1. Metalik köpüklerde ısı iletim katsayısı 34

2.2.2. Isı iletim katsayısı ölçüm teorisi 37

2.3. Gözenekli Ortamda Ses Yutumu ve Ses İletim Kaybı 40

2.3.1. Ses ile ilgili temel kavramlar 40

Sayfa

2.3.2. Ses Ölçümlerinde kullanılan temel parametreler 44
2.3.3. Gözenekli ortamda düzlem ses dalgaları 47
2.3.4. Gözenekli ortamın akustik modelleri 49
2.3.5. Ses yutum katsayısı ölçümü için transfer fonksiyonu yöntemi teorisi 57
2.3.6. Ses iletim kaybı ölçümü için transfer matrisi yöntemi teorisi 61
2.4. Metalik Köpükler 66
2.4.1. Kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin üretim yöntemleri 67
2.4.2. Kapalı gözenekli metalik köpüklerin şekillendirilmesi ve ikincil işlemler 76
2.4.3. Metalik köpüklerin kullanım alanları 78
2.5. Al köpüklerin Isıl ve Akustik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmalar 93
3. MATERYAL VE METOT 105
3.1. Materyal 105
3.2. Tozların Karıştırılması 106
3.3. Presleme İşlemi 107
3.4. Preslenen Tozların Köpürtülmesi 108
3.5. Üretilen Metalik Köpük Numunelerinin Karakterizasyonu 109
3.5.1. Yoğunluk ölçümü 109
3.5.2. Lineer genleşme oranının belirlenmesi 110
3.5.3. Hacimsel genleşme oranının belirlenmesi 111
3.5.4. Gözeneklilik oranının belirlenmesi 112
3.5.5. Ortalama gözenek boyutu 113
3.6. Kapalı Gözenekli Al Köpüklerin Üretim Parametreleri 114
3.7. Kapalı Gözenekli Al Köpüklerin Test Parametreleri 115
3.8. Kapalı Gözenekli Köpüklerin Makro ve Mikro Yapı Analizleri 118
3.9. Al köpük Test Numuneleri Ölçüm Parametreleri 120

Sayfa

3.10. Metot 124

3.10.1. Al köpüğün ısı iletim katsayısının ölçümü 124

3.10.2. Isı iletim katsayısı ölçüm yöntemi 125

3.10.3. Al köpüğün ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri 127

3.10.4. Test ekipmanı ve ölçüm düzeneğinin tanıtılması 128

3.10.5. Ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçüm yöntemi ve standartları 129

3.10.6. Empedans tüpü ses yutum katsayısı ölçümü 130

3.10.7. Empedans tüpü ses iletim kaybı ölçümü 131

3.10.8. Ses yutum katsayısı ve iletim kaybı ölçüm hassasiyeti 133

4. DENEYSEL BULGULAR 135

4.1. Al Köpüğün Etkin Isı İletim Katsayısı Değerleri 135

4.2. Al Köpüğün Ses Yutum Katsayısı 138

4.3. Al Köpüğün Ses İletim Kaybı 147

4.4. Yalıtım Malzemelerinin Isıl ve Akustik Özelliklerinin Karşılaştırılması 159

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 161

KAYNAKLAR 165

EKLER 175

EK-1. Al köpüğün ısı iletim katsayısı ölçüm raporları 176

EK-2. Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları 178

ÖZGEÇMİŞ 187

ÇİZELGELERİNLİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Isı iletim katsayısı, ısıl yayınım katsayısı standartları 12

Çizelge 2.2. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler 16

Çizelge 2.3. Gözenekli ortamda akustik performansa etki eden özellikler..... 31

Çizelge 2.4. Ses yalıtımının değerlendirilmesi ile ilgili yöntemlerin listesi 32

Çizelge 2.5. Ses yutumun değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi..... 32

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan metal tozların fiziksel özellikleri 105

Çizelge 3.2. Alüminyum köpüğün makro yapı özellikleri..... 121

Çizelge 3.3. Alüminyum köpüğün makro yapı özelikleri..... 121

Çizelge 3.4. Farklı delik boyuna sahip Al köpük numuneler 123

Çizelge 3.5. Farklı hava boşluğuna sahip Al köpük numuneler 123

Çizelge 3.6. Kararlı haldeki sıcaklık değişimleri..... 126

Çizelge 4.1. Farklı yoğunluk ve mikro yapıya sahip Al köpüğün EIK değişimi..... 135

Çizelge 4.2. Geleneksel ve sürdürülebilir yalıtım malzemelerinin akustik ve ısıl özellikleri..... 160

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Isı akımlarının şematik gösterimi 9

Şekil 2.2. Malzemede ısı iletimi 11

Şekil 2.3. Bir malzemede ses dalgasının davranışları..... 18

Şekil 2.4. Farklı yüzeylerde sesin yansıması 19

Şekil 2.5. Gözenekli bir malzeme içerisindeki ses yutum mekanizması..... 20

Şekil 2.6. Bir malzemenin ses iletiminin tanımlanması 22

Şekil 2.7. Ses iletim kaybı-frekans grafiği ve etkin malzeme özelliği 23

Şekil 2.8. Ses yalıtımı ve ses yutumu 24

Şekil 2.9. (a) İletim, (b) taşınım ve (c) ışınım ısı transfer modları 33

Şekil 2.10. Ses dalga sayısının resimsel gösterimi 48

Şekil 2.11. Havadaki (solda) ve gözenekli bir malzemedeki (sağdaki) ses yayılımı..... 53

Şekil 2.12. İki mikrofon transfer fonksiyonu yöntemi..... 58

Şekil 2.13. İki ortamı ayıran bir malzemenin ses iletim kaybı 61

Şekil 2.14. Duran dalga tüpünün şematik diyagramı..... 62

Şekil 2.15. Transfer matrisi yöntemindeki giriş ve çıkış değişkenleri..... 63

Şekil 2.16. Gaz enjekte edilerek doğrudan köpük üretim yöntemi..... 68

Şekil 2.17. Köpürtücü madde ilavesi ile ergiyik metalin doğrudan köpürtülmesi..... 69

Şekil 2.18. Formgrip üretim yönteminin şematik gösterimi..... 71

Şekil 2.19. IFAM toz metalurjisi işlem sırası 72

Şekil 2.20. Tek eksenli presleme işlemi kesit görünüşü 73

Şekil 2.21. Metalik köpüklerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi..... 74

Şekil 2.22. 750°C sıcaklıkta köpürtme işlemi uygulan Al/TiH_2 karışımının lineer genişleme davranışı 74

Şekil 2.23. Isıtma başladıktan sonra (a) 0 s, (b) 48 s, (c) 60 s, (d) 72 s, (e) 92 s ve (f) 200 s köpürme süresinde oluşan yapılar..... 75

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.24. a) AlMgCu alaşımlı metalik köpüğün X-ray tomografik görüntüsü b) Her bir gözeneğin bilgisayar destekli bölümleme ile oluşturulan görüntüleri 76

Şekil 2.25. Gözenek yapısına göre metalik köpüklerin kullanım alanları 79

Şekil 2.26. Alüminyum köpüklerin uygulama alanları 79

Şekil 2.27. Metalik köpük uygulamalarının endüstrilerdeki sektörel dağılımı 80

Şekil 2.28. Alüminyum köpük ses bariyerinin ses yutum panel yapısı 82

Şekil 3.1. Sıcak presleme yöntemi ile Al köpük üretimi işlem sırası 106

Şekil 3.2. Serbest köpürtme ile üretilen Al köpüğün kesit görünüşü 109

Şekil 3.3. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı lineer genleşme değişimi 111

Şekil 3.4. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı hacimsel genleşme oranı değişimi 112

Şekil 3.5. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı gözenek oranları değişimi 113

Şekil 3.6. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı ortalama gözenek boyutu değişimi ... 114

Şekil 3.7. (a-c) Kapalı gözenekli Al köpük deney numunelerinin yan kesit görüntüsü 122

Şekil 3.8. (d-f) Katmanlı kapalı gözenekli Al köpük deney numunelerinin yan kesit görüntüsü 122

Şekil 3.9. EIK ölçüm cihazı bölümlerinin şematik görünümü 126

Şekil 3.10. Ses yutum katsayısı (a) ve ses iletim kaybını (b) ölçüm düzeneği şematik görünüşü 128

Şekil 3.11. Ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri akış şeması 129

Şekil 4.1. Al köpüğün sıcaklık ve gözenek oranına bağlı EIK değişimi (30, 60, 90 °C) 136

Şekil 4.2. Al köpüğün sıcaklık ve yoğunluğa bağlı EIK değişimi (30, 60, 90 °C) 137

Şekil 4.3. 1. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği 138

Şekil 4.4. 2. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği 139

Şekil 4.5. 3. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği 140

Şekil 4.6. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişmi 141

Şekil 4.7. 4. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği 143

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. 5.Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği 144

Şekil 4.9. 6.Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği 145

Şekil 4.10. 3. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim karşılaştırması 146

Şekil 4.11. Altı farklı yapıdaki Al köpüğün ses yutum katsayısı değişimi karşılaştırması 147

Şekil 4.12. 1. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi 148

Şekil 4.13. 2. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi 149

Şekil 4.14. 3. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi 149

Şekil 4.15. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi karşılaştırması 150

Şekil 4.16. 4. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi 151

Şekil 4.17. 5. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi 152

Şekil 4.18. 6. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi 153

Şekil 4.19. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi karşılaştırması 154

Şekil 4.20. Altı farklı yapıdaki Al köpüğünses iletim kaybı değişim karşılaştırması..... 155

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim		Sayfa
Resim 2.1.	Kapalı (a) ve açık (b) gözenekli metalik köpükler ve tetragonal gözenek modelleri	67
Resim 2.2.	Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilen bir metalik köpüğün optik mikroskop görüntüsü	69
Resim 2.3.	Alporas yöntemiyle üretilen köpük malzemeye ait gözenek yapısı	70
Resim 2.4.	Formgrip yöntemi ile üretilmiş numunelerin gözenek yapıları	71
Resim 2.5.	Toz metalurji yöntemi ile üretilmiş köpük malzemeler	76
Resim 2.6.	Shneyang'da kullanılan alüminyum köpük ses bariyeri	83
Resim 2.7.	Japonya'da yol kenarında alüminyum köpük ses yutum panelleri	83
Resim 2.8.	Alüminyum köpük ses kaplaması	85
Resim 2.9.	Al köpük ses yutum panellerinin prefabrik yapıların yalıtımında kullanımı	85
Resim 2.10.	Kapalı gözenekli Al köpük ile kaplı bina ve köpük yapı görünüşü	86
Resim 2.11.	(a) Al kaplamalı kır evi ve (b) cephe karolarının detaylı görünüşü	87
Resim 2.12.	Al köpük ile kaplı: (a) seyirci salonunun tavanı ve (b) restoran tavanını	87
Resim 2.13.	Fonksiyonel uygulamalar için farklı filtre tipleri	89
Resim 2.14.	Al ve Cu esaslı açık gözenekli köpükten üretilmiş ısı değiştiriciler	90
Resim 2.15.	Led lambalar: (a) açık gözenekli köpük ve b) kapalı gözenekli Al sandviç köpük kesit görünüşü	90
Resim 2.16.	Güneş ısıl enerji üretiminde alüminyum sandviç köpüklerin kullanımı	91
Resim 2.17.	(a) ASK yüzey kaplamalı barbekü plakası, (b) odun ateşi fırını için basit pişirme plakası	92
Resim 3.1.	Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı	107
Resim 3.2.	Hidrolik pres sıcak presleme ünitesi ve ekipmanları	107
Resim 3.3.	Farklı boyutlara üretilen Al ara ürünlerin görüntüleri	108
Resim 3.4.	Köpürtme işlemi için tasarlanmış özel fırın düzeneği	108
Resim 3.5.	Serbest (a) ve kalıpta köpürtülmüş (b ve c) Al köpük numuneler	115

Resim **Sayfa**

Resim 3.6. Al köpüklerin tel erozyon makinesi ile boyutlandırılması 116

Resim 3.7. Al köpük üzerinde matkap tezgâhında delme işlemi 117

Resim 3.8. Farklı boyutlarda delinmiş numunelerin görünüşü 117

Resim 3.9. Isıl iletim katsayısı ölçümü için kullanılan Al köpük görüntüsü 117

Resim 3.10. Akustik performans ölçümü için kullanılan Al köpük görüntüsü 118

Resim 3.11. Akustik performans ölçümü için kullanılan Al köpük görüntüsü 118

Resim 3.12. Al köpüğün optik mikroskop altında makro yapı analizi 119

Resim 3.13. Al köpüğün optik mikroskop altındaki gözenek ve gözenek boyutu görünüşleri 119

Resim 3.14. Al köpüğün taramalı SEM'de gözenek ve gözenek duvarına ait mikroyapı görüntüleri 120

Resim 3.15. Al köpüğün EDX analizi 120

Resim 3.16. EIK ölçüm cihazı ve ekipmanlarının genel görünüşü 124

Resim 3.17. Empedans tüpü genel görünüşü 127

Resim 3.18. Ses yutum katsayısı ölçümünde kullanılan empedans tüpü 131

Resim 3.19. Transfer matrisi yöntemi ile ses iletim kaybı ölçüm düzeneği 132

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan (m^2)
$\boldsymbol{\alpha}$	Yutum katsayısı
$\boldsymbol{\alpha_\infty}$	Kıvrımlılık
B	Hız genliği (m/s)
$\boldsymbol{c_0}$	Akışkan içerisindeki ses hızı (m/s)
cp	Özgül ısı (J/kgK)
d	Gözenekli malzeme kalınlığı (m)
dB	Desibel
E	Elastisite modulü
$\boldsymbol{f}$	Frekans (Hz)
F	Isı akış dönüştürücü kalibrasyon faktörü (m^2 K/W)
$\mathbf{f_c}$	Kritik frekans (Hz)
h	Isı taşınım katsayısı **(**W/m^2 K)
Hz	Hertz
I	Ses şiddeti (W/m^2)
$\boldsymbol{k}$	Isı iletim katsayısı (W/mK)
$\boldsymbol{keq}$	Karmaşık dalga sayısı
$\mathbf{k_{et}}$	Al köpüğün etkinısı iletim katsayısı (W/mK)
$\mathbf{k_g}$	Havanın ısı iletim katsayısı (W/mK)
$\mathbf{k_k}$	Köpüğün toplam ısı iletim katsayısı (W/mK)
$\mathbf{k_m}$	Al matris ısı iletim katsayısı (W/mK)
$\boldsymbol{K_{eg}}$	Eşdeğer akışkan hacim modülü (N/m^2)
L	Isı akışı yönünde katı fazın uzunluğu (m)
LG	Lineer genleşme
Li	Köpürtme öncesi numune yüksekliği (mm)
$\boldsymbol{l_k}$	Köpüğün yüksekliği (m)
Ln,w	Ağırlıklı darbe ses basınç seviyesi (dB)

Simgeler	Açıklamalar
Lp	Ses basınç seviyesi (dB)
Ls	Köpürtme sonrası numune yüksekliği (mm)
LW	Ses gücü seviyesi (dB)
m	Köpüğün kütlesi (kg)
N	Referans kalorimetre ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
Nu	Nusselt sayısı
η	Viskozite (Pas)
$\widetilde{K}_{ef}$	Sıkıştırılabilirlik modülü (Pa)
$\widetilde{k}_c$	Karmaşık dalga sayısı (1/m)
$\widetilde{m}_c$	Karmaşık yayılma sabiti (1/m)
$\widetilde{\rho}_{ef}$	Karmaşık etkin yoğunluk (kg/m^3)
P_0	Statik ortam basıncı (Pa)
$\dot{Q}$	Birim zamanda ısı akışı (J/s)
v_{in}	Gözeneklerin içindeki ses hız (m/s)
v_x	X yönünde partikül hızı (m/s)
ρ_0	Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)
P	Karmaşık basınç genliği (Pa)
p	Ses basıncı (dB)
PPI	Metal köpüğün bir inch uzunluğundaki gözenek sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Pref	Standart referans basıncı (Pa)
q	Isı transferi miktarı (W/m^2)
q'	Kararlı hal ısı akışı (W/m^2)
R′	Görünür ses azaltım indeksi (dB)
R	Ses azaltım indeksi (dB)
R	Isıl direnç (m^2K/W)
Re	Reynolds sayısı
R_{int}	Toplam arayüz direnci (m^2 K/W)
R_s	Test numunesinin ısıl direnci (m^2 K/W)
R_w	Ağırlıklı ses azaltım indeksi (dB)
R'_w	Görünür ağırlıklı ses azaltım indeksi (dB)

Simgeler	Açıklamalar
t	Zaman (s)
T	Periyod (s)
T_L	Alt ısıtıcı sıcaklığı (℃)
TL	Ses iletim kaybı (dB)
T_m	Alt plaka yüzey sıcaklığı (℃)
T_u	Üst plaka yüzey sıcaklığı (℃)
U	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
v_h	Hava hızı (m/s)
V	Hacim (m^3)
Va	Akışkan fazın kapladığı hacim (m^3)
Vg	Gözenek oranı
V_k	Köpüğün hacmi (mm^3)
Vs	Su içerisindeki ağırlık (g)
Vt	Malzemenin toplam hacimine (m^3)
Vy	Yaş ağırlık (g)
W	Toplam ses gücü (W)
W_{ref}	Referans güç (W)
x	Boyuna eksen (m)
Y	Elastisite modulü (N/m^2)
Zc	Karakteristik empedansı (Ns/m^3)
$\widetilde{Z}_c$	Karakteristik empedans (Rayls)
Z_{eg}	Karakteristik empedans (Ns/m^3)
$\widetilde{Z}_s$	Yüzey empedansı (Rayls)
ΔL	Darbe sesi yalıtımı iyileştirme indeksi (dB)
ΔL_W	Ağırlıklı darbe sesi yalıtımı iyileştirme indeksi (dB)
ΔT	Sıcaklık farkı (K)
ΔTr	Referans kalorimetre boyunca sıcaklık farkı (°C)
ΔTs	Numune boyunca sıcaklık farkı (°C)
Λ'	Isıl karakteristik uzunluk (mm)
Λ	Viskoz karakteristik uzunluk (mm)
v	Partikül hızı (m/s)
ρ_k	Köpüğün yoğunluğu (kg/m^3)

Simgeler	Açıklamalar
ρ_m	Al matris malzemenin yoğunluğu (kg/m^3)
τ	Ses geçiş katsayısı
λ	Ses dalgası boyu (m)
ρ_0	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
σ_{sb}	Stefan Boltzman sabiti (W/m^{2}K^4)
ω	Açısal frekans (rad/s)
$\delta\rho$	Akışkan değişimi yoğunluğu (kg/m^3)
σ	Hava akış direnci (Ns/m^4)
$\partial p/\partial x$	Basınç gradyanı (Pa/m)
ϕ	Malzeme gözenekliliği

Kısaltmalar	Açıklamalar
Al	Alüminyum
AKS	Alüminyum köpük sandviç
CCl_3F	Triklorofloremetan
EIK	Etkin ısı iletim katsayısı
FFT	Hızlı Fourier dönüşümü
IAÖ	Isı akış ölçer
Mg	Magnezyum
NRC	Grültü azaltma katsayısı
s	Saniye
SAA	Ses yutum ortalaması
SBD	Ses basıç düzeyi
Si	Silisyum
SRI	Ses azaltım indeksi
TiH_2	Titanyum hidrür

1. GİRİŞ

Isı ve ses yalıtımı; enerji tasarrufu, konforlu bir yaşam, gürültüsüz ve sağlıklı mekânlar için zorunludur. Sağlıklı ve konforlu ortamlar ile çevrenin korunması gibi konular için önemli olan yalıtım; bir bütün olarak ele alınması ve doğru yalıtım malzemesinin seçimiyle faydalı olacaktır. Yalıtım teknolojileri sayesinde enerji kaybı minimize edilebilmektedir. Uygun yöntemlerle üretilen yalıtım malzemeleri iyi yalıtım performansı sağlayarak uzun ömürlü, ekonomik, çevre dostu ve sağlıklı, yerel ve sürdürülebilir olabilmektedir. Bu kapsamda ısı yalıtımının farklı sektörlerde makul enerji tüketimi sağlaması, ses yalıtımı ile birlikte yeterli konfor ve sağlık koşullarının sağlanması açısından büyük önem taşıdığından gün geçtikçe bu tür yalıtım malzemelerine olan talep artmaktadır.

Türkiye enerji ihtiyacının yaklaşık % 40'ını yerli kaynaklardan karşılayabilmekte olup nüfus artışı, gelişen teknoloji ve sanayileşme ile gittikçe artan enerji ihtiyacı buna karşılık mevcut enerji üretiminin yeterli olmaması son yıllarda yalıtıma verilen önemi arttırmıştır. Enerji sorununu çözmek ve sürdürülebilir bir yaşam ortamının sağlanabilmesi için ülkemiz açısından en iyi çözümlerden biri enerjinin doğru kullanımı ve enerji tasarrufudur. Enerjinin etkin kullanımı sonucunda sağlanacak enerji tasarrufu, daha hızlı ve daha ucuza elde edilen bir enerji kaynağı olduğu bütün dünyada kabul edilen bir gerçektir [1].

Teknolojinin hızla gelişmesi, çok çeşitli alanlarda insanların yaşamlarını olumlu yönde etkilerken, beraberinde getirdiği olumsuzluklar da her geçen gün etkisini göstermektedir. Bunlardan birisi hiç şüphesiz gürültüdür. Günlük yaşamda, istenmeyen ses olarak tanımlanan gürültü, insan sağlığını olumsuz olarak etkiler. Çağımızın problemi haline gelen gürültü, farkında olmadan birçok hastalıkları da beraberinde getirmektedir. İnsanlar evlerinde, işyerlerinde veçevresel gürültü nedeniyle bulundukları her yerde sessiz ortamlara ihtiyaç duymaktadırlar. Dolayısıyla yalıtılmış ortamlar insanlar için vazgeçilemez bir hal almıştır [2].

Nobel ödüllü Robert Koch'un 1910 yılında: "Gün gelecek, insanlar kolera, veba gibi hastalıklara karşı açtıkları savaşı, gürültüye de açacaktır." şeklindeki ifadesi çağımızın hastalığı haline gelen gürültünün zararlı etkisini en güzel şekilde açıklamaktadır [3].

1971’de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından gürültünün, insan sağlığına karşı önemli bir tehdit olarak görülmesi gerektiği belirtilmiştir. WHO’nun yaptığı çalışmalar ile Avrupa nüfusunun % 25’i, insan sağlığını olumsuz olarak etkileyecek derecede 65 dB’den fazla ses şiddeti olan gürültüye maruz kaldığı belirlenmiştir [4].

Sanayileşme ve kentleşmenin artması sonucunda gürültünün önemli bir çevresel kirlilik etkeni haline gelmiş ve Türkiye’de büyük şehirlerde yapılan gürültü ölçümlerinde elde edilen değerlerin sınır değerleri aştığını tespit edilmiştir. Gürültünün insanlarda işitme kayıplarının yanı sıra önemli bir stres nedeni olarak psikolojik, nörovejatatif ve kardiyovasküler sistemleri etkileyerek çeşitli hastalıklara yol açtığı belirlenmiştir [5].

31 Mayıs 2018 tarihinde yürürlüğe giren “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik” ile; her türlü yapı, bina, tesis ve işletmenin işletimi ve kullanımı safhalarında insanların maruz kalacağı, binaların dışından veya içinden kaynaklanan gürültülerin, kişilerin huzur ve sükûnuna, beden ve ruh sağlığına olumsuz etkilerini en aza indirecek iyi işitme ve algılama koşullarının sağlanması için, tasarım, yapım, kullanım, bakım ve işletim bakımından uyulacak kuralların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte mevcut yönetmelikler çok geniş kapsamlı olup etkin gürültü kontrolü için önemli olan bu yönetmeliklerin ilgili bütün paydaşlar tarafından doğru ve tam olarak uygulanmasıdır.

Günümüzde yalıtım malzemeleri, ulaşım endüstrisinde otomotiv, havacılık, demiryolu ulaşımından inşaat endüstrisinde ev, ofis ve elektronik cihazlara kadar pasif gürültü kontrolü ve ısı, ses yalıtımı ile ilgili artan ihtiyaçlar nedeniyle neredeyse her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte kullanım yerine göre boyut ve maliyeti en aza indirgeyen, insan veya çevresel herhangi bir tehlikeye neden olmayan, farklı ortamlarda istenen ısıl ve akustik performans ve konfor şartlarını sağlayan ısı, ses yalıtım malzemelerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar önem kazanmıştır.

Isı, ses yalıtımı ve gürültü kontrolü ihtiyaçlarını karşılayabilmek için çok çeşitli yalıtım malzemeleri geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak: cam yünü, taş yünü, yumuşak poliüretan esaslı köpükler, melamin köpüğü, keçeler, delikli ahşaplar, delikli alçı panolar, mantarlar, kauçuk köpüler örnek olarak verilebilir.

Yukarıda bahsedilen ısı ve ses yalıtım malzemeleri ham madedesine bağlı olarak çeşitli dezavantajları vardır. Mineral yün yeterli dayanımı göstermediği ve liflerin dökülmesi nedeniye nemli ortamlarda kullanıma uygun değildir. Polimerik köpükler, bitümlü keçe veya ahşap yüksek sıcaklık altındaki yanıcı ortamlarda yalıtım malzemeleri olarak kullanılamaz. Ayrıca adı geçen malzemelerin bir çoğu, sınırlı dayanıklılık ve zor geri dönüşümlü olma özelliklerine sahiptir.

Bu bağlamda gözenekli yapıya sahip hafif metalik malzemelerinin gözenek morfolojisi ve yoğunluk dağılımına göre zor şartlarda istenen mekanik, akustik, ısıl ve yapısal özelliklere sahip olabilirler. Bu nedenle ısı, ses ve titreşim sönümleme amaçlı metalik köpüklerin tasarımı, malzeme seçimi, yapısal morfoloji, gözenek geometrisi, gözenek ara yüzü vb. içeren çok boyutlu bir mühendislik araştırma alanıdır.

Günümüzde, çevreye duyarlı gözenekli metaller ve özellikle yüksek korozyon direncine sahip alüminyum köpükler farklı alanlarda potansiyel ses yutum ve yalıtım malzemeleri olarak görülmektedir. Bu malzemelerin en büyük avantajları yüksek sağlamlık, hafiflik, mekanik izolasyon, yangından koruma ve kimyasal kararlılık özellikleriyle eşsiz bir birleşim sağlayan çok fonksiyonlu malzemeler olmasıdır. Ayrıca, alüminyum köpük reaktif ve nemli atmosferde kullanılabilir, ateşe dayanıklıdır, uzun ömürlüdür, iyi bir geri dönüşüm kabiliyeti vardır ve gözenekli yapısı belirli derecede iyi ses yalıtım ve yutum özelliği sunar. Al esaslı metalik köpük koruyucu olarak kullanılan metal levha gibi ek destek malzemesine ihtiyaç duymadan yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Bu nedenle, geniş yelpazeli mühendislik uygulamaları, özellikle de ısıl ve akustik performansı için Al köpüklerin seri üretilmesi için güvenilir, ekonomik açıdan etkili yöntemlerin geliştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar devam etmektedir.

Tezin amacı ve önemi

Yapılan çalışmada zor şartlarda fonksiyonel özellikleri ile birlikte ısı- ses yalıtımı ve gürültü kontrolü sağlama potansiyeli olan metelik köpük değerlendirilmiştir. Metal esaslı köpükler köpük görünümlü gözenekli yapıya sahip metal malzemeden imal edilmiş endüstriyel ürünlerdir. Doğal bir ürün değildir. Doğal köpük olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı “metalik köpük” olarak adlandırılırlar. Metal esaslı köpükler iyi fiziksel, ısıl ve akustik özellikleri sağlayan çok çeşitli hacim ve yüzey özelliklerine

sahip tek bir parça halinde üretilebilen malzemelerdir. Kullanım alanları arasında, otomotiv, uzay sanayi, demiryolu taşımacılığı ve asansörler gibi alanlar bulunmakta, inşaat ve savunma sanayisinde daha yaygın kullanılması için çalışmalar devam etmektedir. Yapılan araştırmalar ve bunların sonucunda elde edilen veriler metal esaslı köpük malzemelerin yakın zamanda farklı alanlarda oldukça fazla yer alacağı ve geleceğin en önemli malzemelerinden biri olacağını göstermektedir.

Ülkemizde de çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen Al esaslı metalik köpüklerin ısı ve ses yalıtım özellikleri hakkında sağlıklı ve yeterli araştırma sayısı çok azdır. Yapılan çalışma ile son yıllarda oldukça ilgi çekmekte olan Al esaslı metalik köpüklerin iyi bir ısı ve ses yalıtımı sağlayacak nitelikte üretimi ve karekterizasyonu üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda faklı oranlarda Al, Si, Mg ve TiH_2 kullanılarak toz metalurjisi yöntemiyle ve sıcak presleme işlemi ile Al esaslı metalik köpük malzeme üretilmiştir. Üretilen malzeme farklı köpürtme sıcaklıklarında ve farklı köpürtme sürelerinde köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan teorik analizler neticesinde belirlenen optimum üretim parametrelerine göre; Al esaslı (AlSiMg) köpük deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen Al esaslı kapalı gözenekli metelik köpükler üzerinde tel erezyon makinesi ile boyutlandırma, yüzey cildinin kaldırılması ve delik delme gibi ikincil işlemler yapılarak ısıl özellikleri ve dik gelen ses dalgası için akustik özellikleri oluşturan ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı deneysel olarak analiz edilmiştir. Isıl özelliklerin araştırılması için aynı kalınlıkta farklı yoğunluk ve gözenek morfolojisine sahip 6 adet köpük numuneler üretilmiştir. Alüminyum köpüklerin farklı yoğunluk, gözeneklilik değerlerinin farklı sıcaklıklarda ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Akustik açıdan ise üzerinde ikincil işlem uygulanmış farklı makro yapıdaki 6 farklı tip alüminyum köpüklerin farklı montaj kombinasyonlarına göre akustik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan bu tez çalışması ile ısı ve ses yalıtımının gittikçe önem kazandığı günümüzde enerjiyi daha verimli kullanan, konforlu, güvenli, daha iyi yaşam ve çalışma koşulları sağlayan ortamların oluşturulmasına katkı sağlanmıştır. Ayrıca bu alanda farklı sektörlerde yapılacak çalışmalara rehberlik edecek ve benzer araştırmalara da önemli bir referans niteliğinde olacak verilere ulaşılmıştır.

Tezin katma değeri ve yaygın etkisi

Bu tez çalışması ile disiplinler arası çalışmanın benzer bir örneği gösterilmiştir. Enerji Sistemleri Mühendisliği, Metalurji Malzeme Mühendisliği, Makine Mühendisliği gibi farklı disiplinlerin entegresi ile inovatif bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma Al esası metalik köpüklerin ısı-ses yalıtımı ve gürültü kontrolü açısından kullanımına yönelik önemli bir kanyak niteliği taşımaktadır. Bu tez gelecekte yapılacak çalışmalara referans olarak bilgi birikimi sağlayıp maliyetleri azaltacağı, zaman ve emek bakımından da fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan bu çalışma farklı alanlarda ısı-ses yalıtımı ve gürültü kontrolü kapsamında gelecekte farklı parametreler dikkate alınarak daha etkin performansa sahip malzemelerin tasarlanarak, üretilip geliştirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde ısı-ses yalıtımı ve gürültü kontrolü ile ilgili kavramlar, gözenekli ortamı akustik açısından tanımlayan teorik modeller, metalik köpükler hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca Al köpüklerin ısıl ve akustik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar değerlendirilmiştir.

2.1. Isı-Ses Yalıtımı ve Gürültü Kontrolü

Isı ve ses ile ilgili temel kavramların ve yalıtım malzemesi özelliklerinin bilinmesi nitelikli (yüksek performanslı), yalıtım malzemelerinin tasarlanarak sağlıklı ve konforlı ortamların oluşturulması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle bu bölümde ısı ve ses ile ilgili fiziksel özelliklerin yer aldığı temel kavramlara ve yalıtım malzemelerine yer verilmiştir. Yalıtım arzu edilmeyen fiziksel etkilerin veya olayların bir ortamdan diğer ortama geçmesini engelleyen işlem ve sistemlere verilen isimdir. Isı geçişinin veya gürültü kapsamındaki seslerin ortamlar arasındaki geçişinin engellenmesi bu kapsamda ele alınabilir.

Gözenekli ses yutum malzemeleri genellikle iyi ısı yalıtım malzemeleri iken tam tersi her zaman doğru değildir. Ses yutucu malzemeler içinde hareketli havayı bulundurması gerekir. Bu nedenle açık gözeneklilik esastır. Bunun tam tersine kapalı gözenekli malzemeler gözeneklerinin içerisinde havanın bulunması nedeniyle malzemenin ısı yalıtım performansının artmasına katkı sağlamıştır.

2.1.1. Isı yalıtımı ile ilgili tanım ve kavramlar

Isı

Farklı sıcaklıkta ve birbirini etkileyecek uzaklıkta bulunan cisimlerin aralarındaki farkı yok edinceye kadar enerjilerini birbirine aktarmalarıdır. Isının temel birimi kalori (cal)'dir. Skaler bir büyüklük olup kalorimetre ile ölçülür [6].

Sıcaklık

Moleküler kinetik enerji aktivitesinin bir göstergesi olup fiziksel bir büyüklüktür. °C, K ya da °F olup termometre ile ölçülmektedir.

Isı transferinin esasları

Termodinamiğin 2. Yasasına göre, iki ortam arasında sıcaklık farkı nedeniyle ısı enerjisi yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama geçer. Isı geçişi iki ortam arasındaki sıcaklık farkı, ortamın ve yüzeylerin özelliklerine de bağlıdır. Bu nedenle ısı transferi mekanizmalarıiletim, taşınım ve ışınım olmak üzere üç temel başlık altında incelenebilir [7].

Isı iletimi

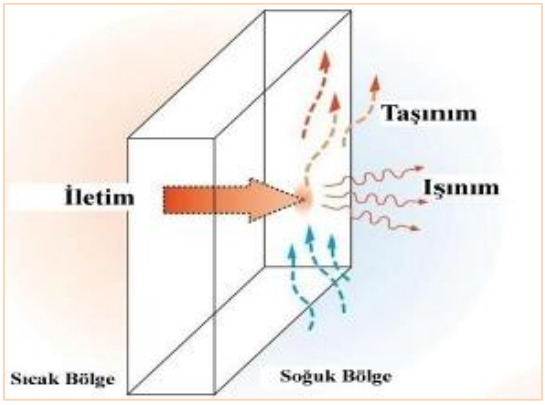
Bir maddenin farklı sıcaklık bölgeleri arasında, yüksek enerjili parçacıklarından (atom veya molekül), düşük enerjili parçacıklara doğru geçen enerji, iletimle ısı geçişi olarak ifade edilir [7]. İletim ile ısı transferi katı, sıvı ve gazlarda gerşekleşebilir. Isı iletiminin gerçekleşmesi, malzemenin ısı iletim katsayısı ile doğrudan; kalınlığı, birim hacim ağırlığı, gözenek çapı, nemi ve ısısıyla dolaylı olarak ilişkilidir.

Isı taşınımı

Taşınım, sıcaklıkları farklı bir katı yüzey ve onu çavreleyen hareketli bir akışkan arasında gerçekleşir. Sıcaklığı yüksek bir katı cisme temas eden sıvı ya da gaz akışkan molekülleri arasında ısı transfer edilir. Taşınımla ısı transferi akışkan özelliklerine, akış hızına ve sıcaklık farkına bağlı olarak değişir.

Isı ışınımı

Isı ışınımı, bir cismin fiziksel bir ortam olmaksızın elektromagnetik dalgalar yardımıyla yaydığı enerjidir. Bütün cisimler (katı, sıvı, gaz) yüksek sıcaklıklarda elektromagnetik dalgalar şeklinde enerjiyi hem yayar hem de yutarlar. Yüzeye gelen ışınımın bir kısmı yüzeyden geçer ve çok kısa bir kalınlıkta yutulur. Isı transferi mekanizmaları Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Isı akımlarının şematik gösterimi [8]

Isıl konfor

Bir ortam içerisinde bulunan insanların rahat ve sağlıklı hissettikleri ısıl ortam şartlarıdır. Avrupa standartlarına göre; bina içi ortam sıcaklığı ile iç duvar yüzey sıcaklığı arasında 2°C'lik fark ısıl konfor olarak tarif edilir.

Hava sıcaklığı

İnsanın kendisini rahat hissettiği ortalama 20 °C civarında sıcaklık derecesidir.

Mekân çevre yüzeylerinin iç sıcaklığı

Ortam sıcaklığının yaklaşık olarak 5 °C derece altında veya üstünde olması durumudur.

Isı yalıtımı

Farklı sıcaklıktaki iç ve dış ortam arasındaki ısı kaybını veya ısı kazancını azaltmak için yapılan işlemlerin tamamı ısı yalıtımı olarak tanımlanır. İnsanların rahat ve sağlıklı yaşamaları için ısıl konfor şartlarının sağlanması, dış ve iç ortam arasındaki ısı (enerji) transferini azaltılarak ısıtma-soğutma giderlerinin düşürülmesi ile yakıt ve enerji tüketimlerinin azaltılmasına yönelik olarak yapıya uygulanan işlemlerdir. Kışın ısı kaybını, yazın ise ısı kazancını azaltmak ısı yalıtımının esas amacıdır [7].

Teknik olarak ısı yalıtımı

Herhangi bir ısı köprüsü oluşturmayacak şekilde, gerekli ısı direncine ulaşmak için dış yüzeylerde yapılan yalıtım şeklinde tanımlanır.

Isı yalıtım malzemesi

Yapılarda iç hacimler ile dış hava ve farklı sıcaklıktaki hacimler arasında; iletim, taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşen ısı akışını azaltan, ısı yalıtımı amacıyla kullanılan, TS 825 standardına göre, ısı iletim katsayısı 0,065 W/mK ve daha düşük değere sahip malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak adlandırılmaktadır. Isı iletim katsayısı bu değerden yüksek olan malzemeler yapı malzemeleri olarak adlandırılmaktadır.

2.1.2. Isı yalıtımının mekanizması

Isı yalıtım malzemeleri, çok sayıda mikroskobik ölü hava gözeneklerine sahiptir ve bu sıkışmış hareketsiz hava taşınım yoluyla ısı transferine karşı koyar. Isıyı yalıtan gözeneklerin kendisi değil, gözeneklerde hapsolmuş hareketsiz havadır. Isıl farklılıkların çok olmadığı durumlarda bu gözenekler ışınım şeklindeki ısı transferine karşı koyar. Bunun nedeni kızıl ötesi uzun dalga ışınlarının ışınım yolunun küçük mesafelere bölünerek, ışınların kırılıp dağılmalarını sağlamalarıdır.

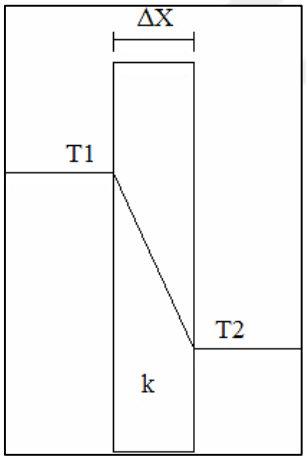
Isı yalıtım malzemeleri ısı iletkenlik direnci özelliği ile iletim, boşluk yapısı özelliğiyle taşınım şeklinde gerçekleşen ısı akımını “engellemek amacıyla” kullanılır. Metaller gibi serbest elektron içeren cisimlerdeki serbest elektronlar ısı iletimine önemli ölçüde katkı sağlarlar. Mikro yapıdaki bu özelliğe karşılık cismin makro yapısındaki gözeneklilik, boşluk içerme gibi düzensiz mikro yapısına ilişkin özellikler ısı iletimi engelleyici bir ortam oluşturur ve cisim ısıyı daha az iletir hale gelir. Bu nedenlerden dolayı, bir katı cisim gözenekli ve boşluklu bir yapıya sahip olduğu takdirde ısı iletkenlik özelliği azalır.

Isı iletim katsayısı değeri çok düşük olan tüm malzemeler dirençli yalıtım malzemeleridir. Hava doldurulmuş bir boşlukta iletim yoluyla gerçekleşen ısı transferi önemsiz derecede azdır, ısı transferi taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşir. Bu nedenle ısı yalıtım malzemeleri, fonksiyon olarak taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini önlemek hedefindedir. Bu amaçla lifli ve gözenekli malzemeler kullanılır. Bu açıdan en iyi verimi

sağlayanlar ise düşük yoğunluklu, kapalı hava kabarcıkları bulunan rijit köpük yapılı malzemelerdir. Tek malzemenin ısı yalıtım özelliği ısı iletim katsayısı (k) ile değerlendirilirken, bir bütün olarak ele alınan yapı bileşeninin ısı yalıtım özelliği kalınlıklarına bağlı ısıl geçirgenlik direnci (R) ile ifade edilir [8].

2.1.3. Yalıtım malzemelerinin ısıl özellikleri ve standartlar

Bir yalıtım malzemesinin ısıl performansını ifade eden ana parametreler kararlı durumda ısı iletim katsayısı (k) ve kararsız durum için ısıl yayınım katsayısı D' dir. Isı iletim katsayısı, malzemelerin birbirine dik 1m. mesafedeki, 1 m²'lik iki yüzeyi arasından sıcaklık farkı 1℃ olduğunda birim zamanda geçen ısı miktarıdır [9]. "k" ile gösterilir. Birimi W/mK'dir. Bir malzemenin ısı iletim katsayısı ne kadar düşükse, ısı geçişine karşı o derece yüksek direnç gösterir ve yüksek ısı yalıtım performansını sağlarlar. Şekil 2.2.'de "x" kalınlığında ve "k" ısı iletim katsayısına sahip bir malzemede iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık değişimi verilmiştir.



Şekil 2.2. Malzemede ısı iletimi [6]

Isıl yayınım katsayısı, ısı iletim katsayısı yani ısıl enerjiyi iletme kabiliyeti k ve malzemenin ısıl enerjiyi depolayabilme kabiliyetini ifade eden yoğunluk ρ ve özgül ısı kapasitesi c_p'nin çarpımı arasındaki orandır. Bu nedenle ısıl yayınım katsayısı, ortamdaki ısıl dalgaların yayılımını açıklar. Isıl yayınım değeri ne kadar büyük olursa ısının ortam içerisinde yayılması o kadar hızlı olur. Birimi m^2/s'dir ve malzemenin kendine has özelliklerinden oluşan türetilen bir niceliktir. Yukarıda belirtilen büyüklükler bir dizi

yöntem ile ölçülebilir veya değerlendirilebilir. Çizelge 2.1'de en çok kullanılan uluslararası standartların bir listesini görülmektedir.

Çizelge 2.1. Isı iletim katsayısı, ısıl yayınım katsayısı standartları [10]

Değişken	S.I. ölçüm birimi	Standart	Not
Isı iletim katsayısı, (k)	W/mK	EN 12664 [11]	Düşük ısıl direnç
		EN 12667 [12]	Yüksek ısıl direnç
		EN 12939 [13]	Kalın malzemeler
		ASTM C518 [14]	Isı akış ölçer cihazı
		ASTM C177 [15]	Muhafazalı sıcak plaka aparatı
		ISO 8990 [16]	Sıcak kutu yöntemi
Yoğunluk (ρ)	kg/m^3	EN 1602 [17]	–
		ASTM C303 [18]	–
Özgül ısı kapasitesi (c_p)	J/kgK	ISO 11357 [19]	–
		ASTM E1269 [20]	–
Isıl yayınım katsayısı (D)	m^2/s	ISO 22007-1 [21]	Genel ilkeler
		ISO 22007-2 [22]	Sıcak disk metodu
		ISO 22007-3 [23]	Sıcaklık dalga analizi yöntemi
		ISO 22007-4 [24]	Lazer flaş yöntemi

Katmanlı bir malzeme için, ısıl özellikler ısıl geçirgenlik [25] değeri ile ifade edilir. Bir kompleks bileşen veya homojen olmayan bir malzemenin 1m mesafedeki iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 1 K =1ºC olduğunda 1 saatte birim alanı boyunca geçen ısı akışı olarak ifade edilir. Birimi W/m^2K'dir. Isıl geçirgenlik direnci R (m^2/KW) ısı geçirgenliğin aritmetik olarak tersidir. Ayrıca ısıl geçirgenlik hesaplanırken yalıtım malzemesinin kalınlığı ile taşınım ve ışınımla ısı transferinin her ikisi de dikkate alınır.

2.1.4. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler

Sadece ısıl iletim katsayısına bakılarak seçilen bir ısı yalıtım malzemesiyle istenilen sonuçlara ulaşmak mümkün değildir. Malzemenin uygulandığı ortamdaki nem ve yoğuşma problemleri sebebiyle ısı yalıtım malzemesinin başka özelliklere de sahip olması gereklidir. Isı yalıtım malzemesi seçerken ısıl performanla birlikte dayanıklılık, maliyet, basınç dayanımı, su buharı emilimi ve iletimi, yangına karşı direnci, uygulama kolaylığı ve ısıl iletim katsayısı da dâhil olmak üzere birçok parametre göz önüne alınmalıdır. Bu bölümde ısı yalıtım malzemelerinde bulunması gereken özellikler üzerinde durulmuştur.

Yoğunluk

Malzemenin birim hacminin kütlesine yoğunluk adı verilir. Isı yalıtım malzemelerinde yoğunluk ısı iletim katsayısını doğrudan etkilemesede boyutsal kararlılık ve mekanik dayanım açısından yoğunluk belirleyici olmaktadır.

Boyutsal kararlılık

Yalıtım malzemelerinin yüzeyleri uygulama alanlarına göre farklı sıcaklık değişimlerine maruz kalabilirler. Isı yalıtım malzemelerinin sıcaklık veya basınç değişimleri karşısında boyutsal kararlılıklarını koruması iyi bir ısı yalıtım hizmeti vermesinde belirleyici faktördür.

Mekanik dayanım

Isı yalıtımı amaçlı kullanılan malzemeler uzun ömürlü kullanım için mekanik yük ve darbelere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu malzemelerin kullanım ömrünü arttrmak için koruyucu sac levha gibi ek malzemeler ile birikte montaj yapılmaktadır. Isı yalıtım malzemelerinin mekanik dayanımları malzemede %10 deformasyon oluşturan basma gerilmesi değeri olarak kabul edilir.

Buhar difüzyon direnci

Su buharı, basıncın yüksek olduğu ortamdan, az olduğu ortama doğru ilerleme eğilimindedir. Malzemelerin bünyesinde buhar geçişine gösterdiği direnç, o malzemenin buhar difüzyon direnci olarak tanımlanır. Buhar difüzyon direnci yükseldikçe malzemenin içerisinden geçebilecek buhar miktarı azalır. Isı yalıtım malzemeleri bulunduğu yapıya nefes aldıracak kadar buhar geçirmesi beklenir.

Su emme

Isı yalıtım malzemelerinin gözenek yapıları, malzemelerin hacimce su emme miktarlarını etkilemektedir. Isı yalıtımında kullanılan birçok malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ısıl iletkenliğinin artması, nemi absorbe etmesine neden olur. Uygulanan yalıtım malzemesi nem içeren bir ortamda veya atmosferik şartlarda (kar, yağmur vb.) ise yalıtımının üst

yüzeyi su geçirmez bir tabaka ile örtülmesi gerekir. Aksi takdirde hem yalıtım özelliğinin azalmasına hem de diğer yapı bileşenlerinin olumsuz etkilere maruz kalmasına sebep olurlar [7].

Kimyasal etkenlere karşı dayanımı

Isı yalıtım malzemeleri farklı yapı malzemelerinde olduğu gibi kimyasal etkilere maruz kalabilir. Bu nedenle ısı yalıtım malzemelerinin çeşitli kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması, kimyasallara karşı nötr olması ve onlarla etkileşime girmeyerek yalıtım özelliğini kaybetmemesi istenir.

Sıcaklık dayanımı

Isı yalıtım malzemelerinin deforme olmaya ve özelliklerini kaybetmeye başladığı bir sıcaklık değeri bulunur. Bu nedenle ısı yalıtım malzemeleri uygulandığı yüzeyde maruz kalacağı sıcaklığa uygun olarak seçilmelidir.

Yanmazlık ve alev geçirmezlik

Isı yalıtım malzemeleri farklı yapıdaki malzemelerden oluşmaktadır. Organik, anorganik ve sentetik oluşlarına göre yanıcı ya da yanmaya karşı dirençli olabilirler. Bu nedenle ısı yalıtım malzemesi maksimum çalışma sıcaklığının üstünde bir sıcaklıklığa maruz kalmamalı ve malzemenin sıcaklığa dayanma sınırı, maksimum yüzey sıcaklığının üstünde olmalıdır [7]. İyi bir ısı yalıtım malzemesi alev direncine sahip olmalı, zehirli gaz ve toksiteye neden olmamalıdır. Ayrıca en az B1 (zor alev alan malzemeler) yangın sınıfında olmalıdır.

İşlenebilirlik

Isı yalıtım malzemelerinin kullanılacağı yere uygulanabilmesi için, değişik aletler ile kesme, delme, yapıştırma, oyma, vb. ikincil işlemlerin kolaylıkla yapılabilmesine imkan sağlaması istenir.

Montaj kolaylığı

Birçok ısı yalıtım malzemesi yapısı gereği kullanıldığı yerlerde mekanik etkilere maruz kalmaktadır. Bu sebeple başka bir malzeme ile korunmaları gerekmektedir. Yalıtım malzemeleri uygulama yüzeyine katmanlı yapıya izin verecek şekilde monte edilmesine sağlayacak yapıda olmalıdır.

Çürümezlik

Isı yalıtım malzemesinin uzun yıllar hizmet verebilmesi için çeşitli etmenlerin etkisi ile çürümemesi ya da çözülmemesi gerekmektedir [7].

Parazitlere dayanıklılık

Isı yalıtım malzemeleri yapısal olarak çeşitli hayvan, böcek vb. parazitleri barındırmamaları, bunların etkisi ile niteliklerini kaybetmemeleri gereklidir [6].

Uzun ömürlü olması

Isı yalıtım malzemelerinin yalıtım özelliğini koruyarak uzun ömürlü kullanım sağlaması istenir. Böylece enerjiden daha fazla tasarruf edilmesini ve uygulandığı yüzeylerin ömrünün uzamasına katkıda bulunur.

İnsan sağlığına ve çevreye zararlı olmaması

Yalıtım malzemelerinin alerji yapmaması, kanser vb. hastalıklara neden olmaması ve toksisite gibi insan sağlığına zarar verecek etkilerinin olmaması istenir. Çalışma şartlarında ve yangın esnasında CO gibi zehirli gaz açığa çıkarmamalı, çevreye zarar vermemesi gereklidir.

Kokusuzluk

Isı yalıtım malzemeleri koku yaymamalıdır. İstenmeyen koku, bu tür yalıtım malzemelerinin gerek uygulanması sırasında, gerekse de uygulamadan sonraki dönemlerde

insan sağlığına zarar verebileceği gibi iç ortamdaki konfor koşullarının bozulmasına sebep olur [6].

Maliyet

Çalışılan ortama uygun yalıtım malzemesi seçimini belirleyen yalıtım maliyeti, malzemenin yalıtım kalınlığı ve malzemelerin üretim maliyetlerine bağlı olarak ortaya çıkar. Burada esas önemli olan, malzemenin yalıtım performansının tahmin edilerek uygun yalıtım malzemesinin uygun ortamda, doğru kalınlıkta ve uzun ömürlü olacak şekilde kullanılabilirliğinin belirlenmesidir [7].

Bir yalıtım malzemesinde bulunması istenen ısıl ve diğer bütün özelliklerin tek bir malzemede bulunması pratik olarak imkânsız olmakla birlikte, bunların önemli bir kısmına sahip olan malzemeler bulunmaktadır. Yapılan ve yapılacak araştırmalar ile bu özelliklerin birçoğuna sahip farklı maddelerden elde edilen kompozit yalıtım malzemelerinin istenen yalıtım performansını makul enerji tüketimi, yeterli konfor ve sağlık koşulları sağlayacak nitelikte üretilebilir. Aşağıda Çizelge 2.2'de ısı yalıtım malzemelerinin sahip olmaları gereken genel özellikler listelenmiştir.

Çizelge 2.2. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler [10]

Fiziksel işlevsellik	Dayanıklılık	Ekolojik Açıdan Uygunluk	Uygulama Kolaylığı	Ekonomiklik
Yüksek ısı tutuculuk	Mekanik dayanım	İnsan sağlığı açısından zararsızlık	Kolay işlenebilirlik	Ucuzluk ve kolay temin edilebilirlik
Düşük birim ağırlık	Su ve neme dayanıklılık	Çevre ve ekosistem açısından zararsızlık	Üzerine uygun katmanların uygulanmasına olanaklılık	
Koşullara uygun buhar geçirimliliği	Kimyasal etmenlere dayanıklılık	Az enerji tüketimi	Kolay montaj edilebilirlik	
Yeterli basınç dayanımı	Biyolojik etkilere dayanıklılık	Bakım gerektirmezlik ve kullanım sonrası değerlendirilebilirlik		
Yeterli çekme dayanımı	Yanmazlık ve alev geçirmezlik	Kokusuzluk		
Boyutsal kararlılık	Çürümezlik			
Düşük ısı iletim katsayısı	Uzun ömürlülük			
Yüksek ısıl direnç	Parazitlere dayanıklılık			
Uygun yoğunluk				

2.1.5. Ses yalıtımı ve gürültü kontrolü

Akustik kelime anlamı ses bilimi olarak ifade edilmektedir. Akustik malzeme bilimi ve bu alanla ilgilenen uzmanlar ise sesi ve sesin çevre ile olan ilişkisini inceler ve ne şekilde bir etki oluşturduğunu tanımlarlar. Sesin oluşturabileceği olumsuz etkilerin giderilmesi için, yapısal ve tasarımsal çalışmalar yaparlar.

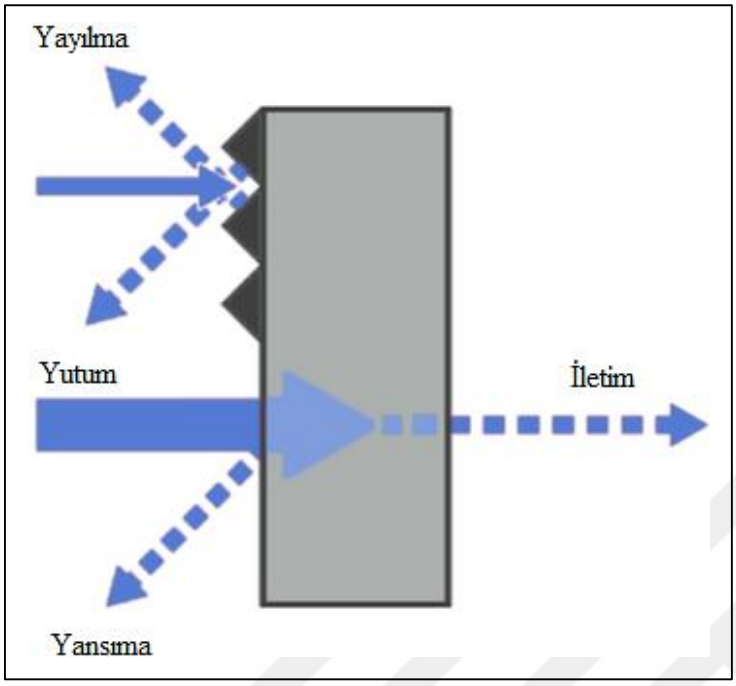
Ses, atmosferde canlıların işitme organları tarafından algılanabilen, titreşim yapan bir kaynağın hava, su ya da benzeri elastik bir ortamda oluşturduğu periyodik basınç dalgalanmaları ile meydana gelen fiziksel olay olarak tanımlanır. Ses, hava ve yapı kaynaklı olarak ikiye ayrılır. Ses kaynağının titreşimi ile hava içinde yayılarak iletilen sesler hava kaynaklıdır. Yapı kaynaklı sesler ise doğrudan katı ortamda iki kütlenin birbirine çarparak titreştirmesi sonucu oluşan ve malzeme içinde her doğrultuda iletilen, sürekli veya kesikli seslerdir. Ses dalgasının yayılması için maddesel ortama ihtiyaç vardır. Dolayısıyla, ses oluşumunun ve farklı ortamlardaki yayılımının bilinmesi, ses yalıtımı ve gürültüye karşı alınacak önlemler açısından önemlidir.

2.1.6. Ses ile ilgili fiziksel olaylar

Farklı bir enerji türünün ses enerjisine dönüşerek ortaya çıkması, doğal ya da yapay olabildiği gibi mekanik veya fiziksel olay sonucu ses titreşimlerinin meydana gelişi ile de olabilmektedir. Ses üç boyutlu ortam olarak sınırsız ortam (açık hava) ve sınırlı ortamlarda (kapalı alan) yayılır. Açık havada yayılan ses, toprak ve bitkilerin neden olacağı yansımalar önemsenmez ise düzgün dalgalar halinde yayılır. Ancak, farklı amaçlara yönelik alanların tasarlanması sırasında kapalı alanlarda karşılaşılan ses ile ilgili problemler, açık havada sesin yayılımına göre daha karmaşıktır. Bu nedenle bu bölümde ses ile ilgili fiziksel olaylar, “kapalı alanlardaki sesin yayılımı” esas alınarak belirtilmiştir [26].

Termodinamiğin birinci kanununa göre (enerjinin korunumu), enerji yoktan var edilemeyeceği gibi vardan yok edilemez, sadece bir durumdan başka bir duruma dönüşür. Bu kanunun bir neticesi olarak, ses dalgası herhangi bir yüzeye çarptığında, çarpan ses enerjisinin bir kısmı bu yüzey tarafından ısı enerjisine dönüşerek yutulur, bir kısmı yansıma kurallarına göre yansır, geri kalan kısmı da iletilir (Şekil 2.3). Bu nedenle gelen ses enerjisi, ses yutum enerjisi, ses yansıma enerjisi ve ses iletim enerjisinin toplamına

eşittir. Sesin yutulma, yansıma ve iletim oranları ise malzemelerin cinsine, şekline ve yüzeylerine göre farklılık gösterir.



Şekil 2.3. Bir malzemede ses dalgasının davranışları

Ses dalgasının yayılması

Sesin yayılması, ses dalgalarının yüzeyden rastgele dağılımı veya saçılması şekilde gerçekleşir. Sesin kapalı alanlarda, mekânın geometrik özelliklerine göre yayılması büyük önem taşımaktadır. Ses, mekânın geometrik özelliklerine göre; tek boyutlu ortamlarda düzlemsel dalgalarla, iki boyutlu ortamlarda düzleme yakın karmaşık dalgalarla, üç boyutlu ortamlarda küresel dalgalar halinde yayılır.

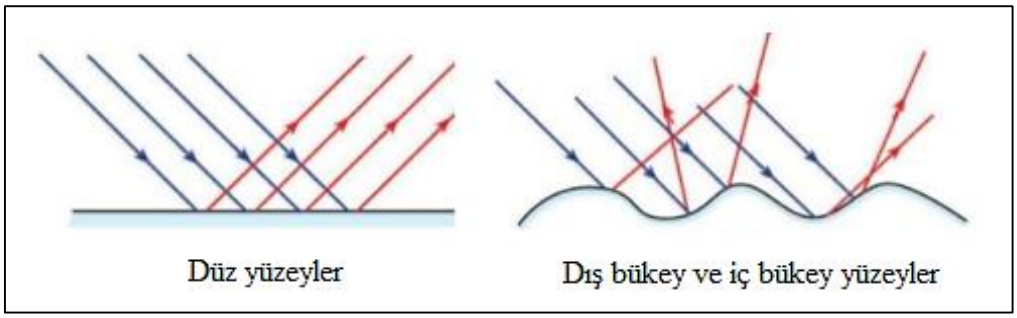
Tek boyutlu ortamlarda ses ya ortam içerisinde oluşur ya da dışarıdan ortama girer. Küresel ses dalgaları bu ortama girdikten sonra düzlem dalgalara dönüşür. Düzlemsel ses dalgalarında sesin mesafe ile azalması neredeyse mümkün olmamaktadır. İki boyutlu ortamlarda ses, uzak mesafelere az bir kayıpla ulaşmaktadır. Üç boyutlu ortamlar ise sınırsız ortam (açık hava) sınırlı ortam (kapalı hacimler) olarak ifade edilir. Burada meydana gelen yayılım, küresel dalgalar halinde olup yayılma, doğrultusuz ve karmaşıktır.

Sesin kırılması

Ses kırılması, ses dalgalarının bir engelle karşılaştığında yön değiştirmesi olayına denir. Işıktaki kırılma gibi seste de kırılma, engelin boyutları ve dalganın boyuna göre farklılık gösterir. Sesin dalga boyu eğer bir engelin boyutlarından büyükse kırılma olayı meydana gelir. Kırılma genellikle düşük frekanslarda söz konusu olup, köşe, kolon, kiriş ve duvarlar gibi engellerde bükülerek uzaklaşır ya da dağılır. Yansıtıcı özelliğe sahip, küçük, üniform ve düz yüzeylerde ise istenmeyen kırılma etkileri oluşabilir [27].

Sesin yansıması

Yayılan ses dalgaları duvar, metal, taş, tuğla, cam gibi rijit ve düz yüzeylere çarparak doğrultularını değiştirirler. Bu olaya yansıma adı verilir. Yansıma esnasında sesin özellikleri değişmez. Yansıyan ses dalgaları tekrar geriye dönerse ikinci bir ses meydana gelir. Bu sese yankı denir. Rijit ve düz yüzeyler ses enerjisinin neredeyse tamamını yansıtır. Yansımada yüzey düz ise gelen ve yansıyan ışın açıları eşit olur. Dış bükey yüzeyler ses saçıcı özellik taşırken, iç bükey yüzeylerse yansımış ses dalgalarını yoğunlaştırır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Farklı yüzeylerde sesin yansıması

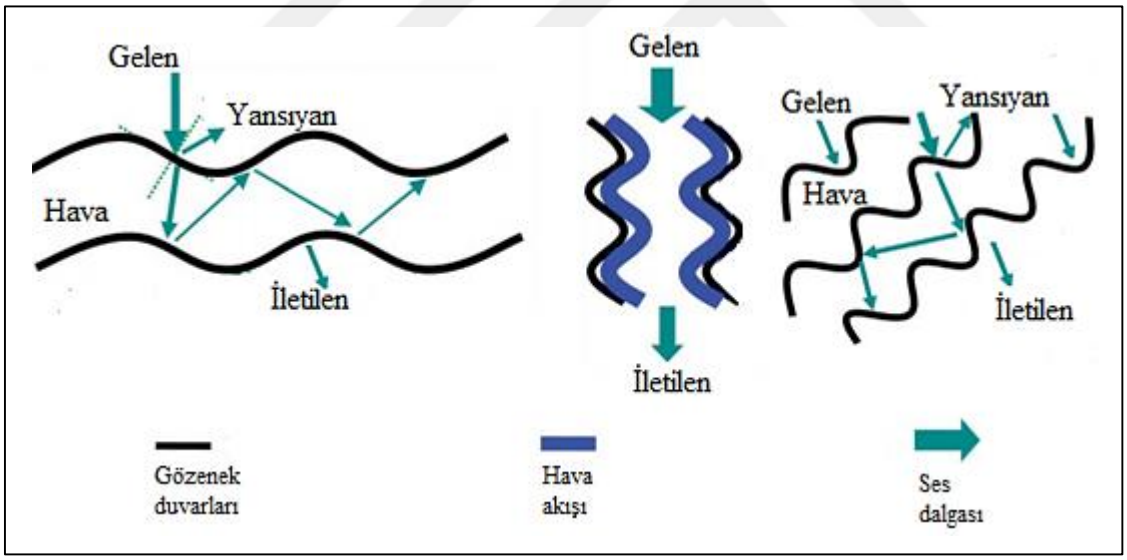
Sesin yutulması

Ses dalgasının bir engelle karşılaşması durumunda, ses enerjisinin gözenekler arasındaki direnç ve sürtünme etkisi ile o engel tarafından ısı enerjisine dönüştürülmesi olayıdır. Ancak burada dönüşen ısı enerjisi miktarı çok azdır. Yaklaşık tüm yapı malzemeleri sesi belli ölçüde yutar. Hacim içinde başarılı ses veya gürültü kontrolü sağlanması için yüksek ses yutuculuğuna sahip malzemelerin kullanılması oldukça önemlidir. Diğer taraftan ses

yutumu, sürtünme veya ısı kaybı (gözenekli malzemeler) veya rezonans olayı (delikli ve membran emiciler) nedeniyle bir malzemenin içinde dağılan akustik enerjinin bir bölümü olarak tanımlanır.

Bir malzemenin akustik performans etkinliği, ses yutum katsayısı (α) ve ses iletim kaybı (TL) ile ifade edilir ve frekansa bağlı olarak değişim gösterir. Bu ifade (α), malzemenin yuttuğu gelen ses enerjisi oranını belirtir. Teorik olarak 0 ile 1 arasında değişebilir. Yüksek ses yutum katsayılarına sahip malzemeler (0.70'den daha büyük) ses yutucu malzeme veya ses yutum malzemesi olarak adlandırılır. Ses yutum katsayısı α=0.99 olduğu zaman ses tamamen yutulur. Ses yutum katsayısı α=0.01 olduğu zaman ses yutumu önemsizdir [26].

Sesin yutulması, ses enerjisinin farklı bir enerji türüne (ısı enerjisi) ya da ses dışı titreşimlere dönüşmesi olarak tanımlanır. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi gözeneklerdeki kanallar ses dalgasının geliş yönüne göre dikey, paralel veya açılı olabilir.



Şekil 2.5. Gözenekli bir malzeme içerisindeki ses yutum mekanizması [28]

Gözenek kanalları, ses dalgasının geliş yönüne dikey olduğunda gözenek duvarları ve ses dalgası arasındaki hava titreşimi ve sürtünme nedeniyle ses enerjisi sönümlenir. Gözenek kanalları, ses dalgasının geliş yönüne paralel olduğunda, ses dalgası hava akışına neden olur ve ses enerjisi viskoz kayıpla dağılır. Ayrıca ses dalgaları gözenek duvarları arasındaki sürtünme nedeniyle ses enerjisi ısı enerjisine dönüşerek sönümlenir. Gözenek kanalları, ses dalgasının geliş yönüne açılı olduğunda, ses enerjisi hem viskoz kayıplar hem de ısı etkisine bağlıdır. Bu nedenle, ses dalgaları sürekli olarak yansıtıldığında, hareket

yollarının uzamış olduğunu ve böylece hava ve gözenek duvarları arasındaki etkileşime neden olduğu Şekil 2.5'de görülmektedir.

Herhangi bir iç ortamda veya mekânda ses yalıtımı dış ortamda meydana gelen gürültünün içeriye veya iç ortamdaki gürültünün diğer ortamlara geçmesinin önlenmesidir. Yaşanılan konut, okul, iş yeri vb. binalar ile çevreyi yalıtarak istenmeyen seslerin zararlı etkilerinden korunmak; kayıt stüdyoları, sinema, konser salonu vb. mekânları istenmeyen seslerden yalıtarak gerekli kullanım koşullarını oluşturmak amacıyla yapılan uygulamalar ses yalıtımı örnekleridir. Ses yalıtımı yapabilmek için prensip ses dalgalarının bir yüzeyde durdurulması veya söndürülmesidir. Yapı kaynaklı ses yalıtımı ve hava kaynaklı ses yalıtımı olmak üzere ikiye ayrılabilir. İç mekânlardaki çoğu ses hava doğuşumludur. Konuşma, müzik aletleri, fanlar, motorlar, uçaklar ve arabalar hava ile yayılan ses oluştururlar.

Ortamın ses yalıtımı ses kaynağının yer aldığı ortamı alıcı ortamdan ayıran bir akustik malzeme ile sağlanır. Havadaki ses dalgaları gözenekli malzemeye çarparak titreşim sonucunda kaynak ortamdan alıcı ortama geçer. Malzemeden iletilen sesin enerjisi malzemenin ses iletim kaybına göre değişmektedir. Malzemeye gelen ses enerjisinin malzemeden iletilen ses enerjisine oranı (desibel cinsinden dB) ses iletim kaybı (TL) olarak tanımlanmaktadır. Bir akustik malzemenin ses yalıtım özelliğini açıklamakta kullanılan ses iletim kaybı (TL), yutuculukta olduğu gibi frekansa bağlı olarak değişim gösterir.

Malzemeden iletilen sesin, malzemeye gelen sesin şiddetine oranı ses geçiş katsayısını (τ) verir. Ses geçiş katsayısı değeri, 0 ila 1 aralığındadır. $\tau = 0$ demek, bir malzemeden ses geçişinin olmadığı yani ses yalıtımının mükemmel olduğu anlamına gelir; $\tau = 1$ ise, tüm ses malzeme tarafından geçiriliyor yani malzeme akustik olarak saydam demektir. $\tau = 1$' e örnek olarak malzeme içerisinde dışarıya açık bir boşluklardan sesin olduğu gibi öbür tarafa geçmesi gösterilebilir. Eğer $\tau = 0{,}2$ ise ortaya çıkan ses enerjisinin %20'si iletilmiş demektir.

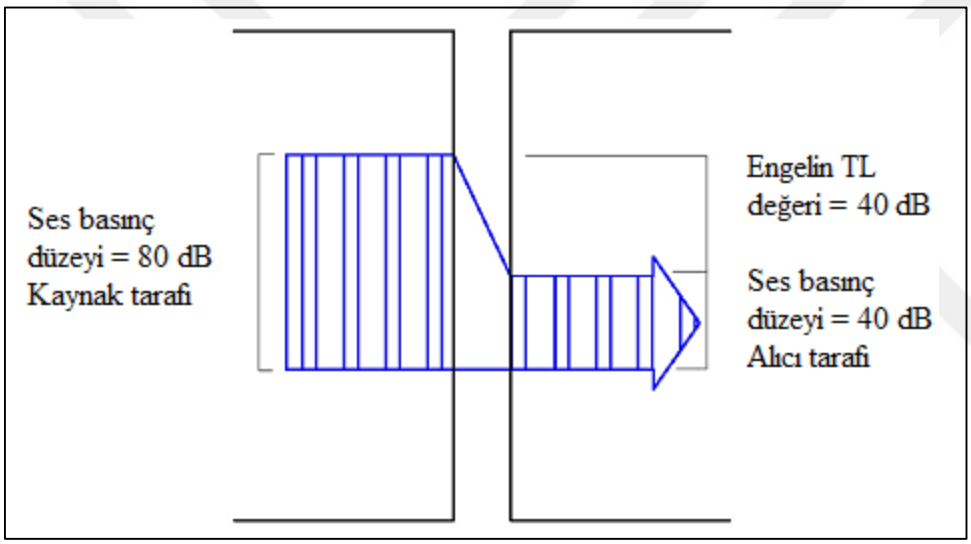
Ses iletim kaybı (TL) bina akustiğinde ses veya gürültü azaltım indeksi olarak adlandırılır. Ses enerjisinin malzemeden geçerken ne kadar azaldığını gösterir. Ne kadar az ses enerji geçişi olursa ses geçiş kaybı o kadar fazla olmaktadır. Örneğin, ses kaynağı tarafındaki ses

basınç düzeyi 80 dB, algılayıcı tarafındaki ses basınç düzeyi 40 dB ise, malzemenin TL değeri Şekil 2.6'da görüldüğü gibi 40 dB'dir.

Akustik bir malzemenin TL değeri ne kadar büyük olursa sağladığı ses yalıtımı da o derecede büyük olur. Şekil 2.6'da görülen TL değeri 40 dB olan bir malzemenin ses yalıtım performansı TL değeri 10 dB olan bir malzemeden daha iyidir [27].

Eş. 2.1'de ses basıç düzeyi (SBD)'ye göre TL hesabı verilmiştir.

TL = SBD kaynak tarafı – SBD alıcı tarafı (2.1)



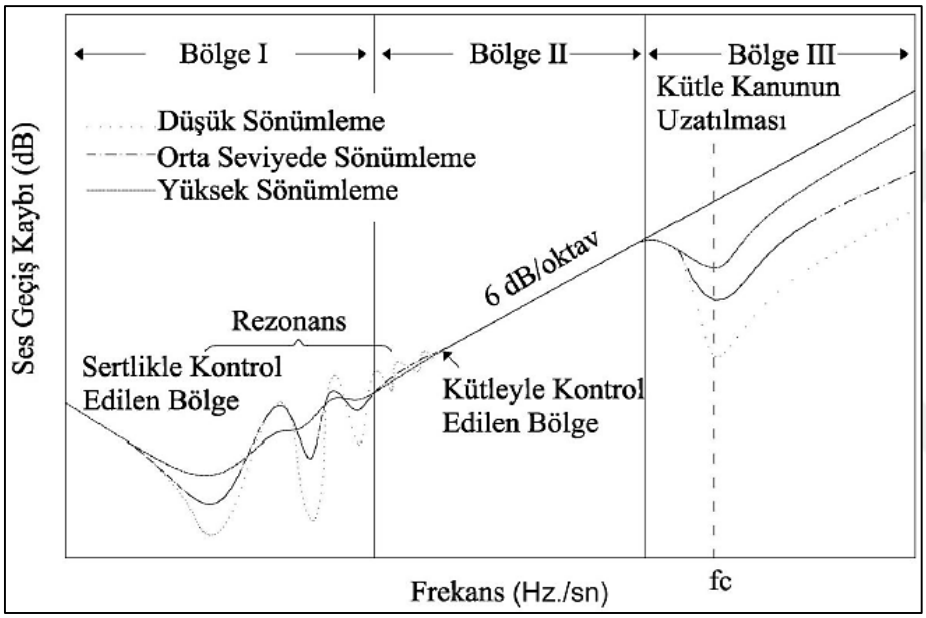
Şekil 2.6. Bir malzemenin ses iletiminin tanımlanması [27]

Ses dalgalarının frekansı yükseldikçe malzemede rezonans frekansı denilen bir seri frekansta titreşim yapacaktır. Boyutlarına, ağırlığına ve gelen ses dalgası hızına bağlı olarak belirli frekanslarda malzeme rezonans etkisine girebilir. Gelen ses dalgasıın frekansı malzemenin rezonans frekansı (doğal titreşim frekansı) ile çakışırsa sesin malzemeden geçişi fazla olmakta malzemenin ses geçirmezliğinin azalmasına yol açmaktadır.

Ses dalgasının katı ortamlardaki davranışı frekansa ve malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişir. Genel olarak incelendiğinde, düşük frekanslarda malzemenin sertliği etkilidir. Frekans yükselip rezonans bölgesine girdiğinde ise ses geçiş kaybını malzemenin sönümlemesi etkiler. Orta frekans bölgesinde ise ses geçiş kaybı malzemenin kütlesine

bağlıdır. Malzemelerin sertlikleri elastisite modülü ile, dolaysıyla mukavemeti ve şekil değiştirmesi ile bağlantılıdır. Malzmenin sertliği, onun TL değerini azaltır [27].

Şekil 2.7'de, ses geçiş kaybı-frekans grafiğinde ses dalgasının davranışı ve malzemenin hangi özelliğinin etkili olduğu şematik olarak ifade edilmiştir. Ses dalgasının davranışında belirgin farklar olduğu için grafik düşük, orta ve yüksek frekanslar olarak üç ayrı frekans bölgesine ayrılmış ve her bölge ayrı ayrı incelenmiştir.

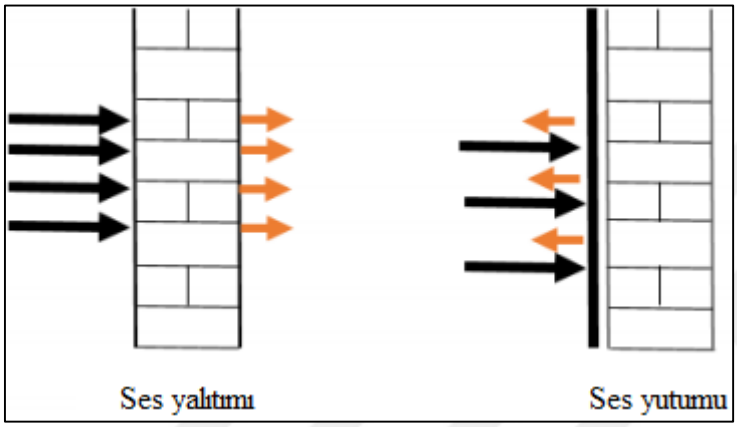


Şekil 2.7. Ses iletim kaybı-frekans grafiği ve etkin malzeme özelliği [29]

Ses yalıtmı ve ses yutumu arasındaki ilişki

Sesin yutulması ve sesin yalıtımı farklı kavramlardır. Ses yutumu lineer bir kavramken, yalıtım logaritmik bir kavramdır ve karıştırılmaması gerekir. Ses yutuculuk katsayısının doğrusal ölçekte, ses geçiş kaybının logaritmik ölçektedir. Eğer bir malzeme havayı geçiriyorsa, sesi de geçirir. Bu yüzden gözenekli bir ses yutucu malzeme havayı geçirdiği için zayıf ses yalıtımı sağlar fakat başarılı bir şekilde sesi yutar. Örneğin bir ses yutum malzemesi tek başına aynı kalitede bir ses yalıtımı sağlamayacaktır. Çünkü yoğunluğu azdır ve hava geçirimlidir. Bu nedenle ortalama bir ses yalıtım değeri aranıyor ise ses yalıtım malzemesi olarak kullanılması doğru olmaz. İyi ses yalıtımı sağlayan malzemeler hava geçirimsiz olmalıdır.

Bu iki kavram çoğu kez birbirleriyle karıştırılır; ses yutumunda, hava partikülleri, yalıtım malzemesi içinde sürtünerek sesin bir kısmını ısı enerjisine dönüştürürler. Böylece sesin enerjisi azalır. Ses yutumu ifadesi, ses kaynağından çıkan sesin ne kadarının kaynağın bulunduğu ortamda yutulduğunu belirtir. Ses yalıtımında ise ses dalgaları, içinde yol aldıkları ortamdan farklı yoğunluk veya esneklikte bir engelle karşılaşırsa enerjinin bir bölümü yansıtılır, bir kısmı da ısı enerjisine dönüşerek soğurulur, kalan kısım da geçişini tamamlar (Şekil 2.8). Dış kaynaklı gürültünün iç ortama geçişini az veya çok derecede önlemek için kullanılan malzemeler ses yalıtımına örnek teşkil eder [30].



Şekil 2.8. Ses yalıtımı ve ses yutumu [31]

Gürültü ve gürültü kontrolünün planlanması

Ses nesnel bir kavramdır ve varlığı kişiden kişiye değişmez. Gürültü ise öznel bir kavram olup fiziksel olarak gelişigüzel yapılı ve birbiri ile uyumlu frekans bileşenleri olmayan genelde yüksek düzeyli, karmaşık, hoşa gitmeyen, istenmeyen, rahatsız edici ses olarak tanımlanmaktadır [32,33]. Gürültü, insanların işitme duyusunu olumsuz yönde etkileyen fizyolojik ve psikolojik dengesini bozan, çalışma performansını azaltan, çevrenin dinlendirici özelliklerini azaltarak veya yok ederek niteliğini değiştiren, karmaşık seslerden oluşan önemli bir çevre kirleticisidir [34].

Gürültü kontrolü oldukça karmaşık bir uzmanlık konusudur. Herhangi bir ses kaynağından yayılan gürültü niteliğine sahip sesleri, kabul edilebilir seviyeye indirgemek, akustik niteliğini değiştirmek, etki süresini azaltmak, hoşa giden veya daha az rahatsız eden başka bir ses ile maskelemek gibi metodlarla zararlı etkilerini tam olarak gidermek veya kabul edilebilir bir seviyeye indirme işleminin bir bütünüdür.

Gürültü, yayılma ortamı ve doğuş biçimi dikkate alındığında iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Hava kaynaklı akış yolu ile ortaya çıkan gürültü veya kaynağı önemini yitiren gürültüdür. Bir hoparlörden çıkan ve kişilere ulaşan ses buna en güzel örnektir. Yapı kaynaklı bir yapıdaki değişken kuvvetlerin oluşturduğu ve yapı yolu ile iletilen gürültüdür. Kişilerin ayak seslerinden ortaya çıkan darbe gürültüsü bu tür gürültünün en belirgin şeklidir.

Gürültü kontrolü ise gürültü kaynağında aktif kontrol, gürültünün yayıldığı çevrede pasif kontrol (kaynak alıcı arasında akustik malzemeler kulanılarak) ve gürültüden etkilenen kullanıcıda olmak üzere üç şekilde sağlanabilir.

2.1.7. Akustik malzemelerin kullanımı ve özellikleri

Gürültü kontrolü ve ses yalıtımı amaçlı kullanılan malzemelerin ses dalgalarının malzeme içerisine girmesini, yayılmasını, sürtünme yoluyla ses enerjisinin sönümlenmesini sağlayacak bir iç yapıya sahip olması gerekmektedir [35].

Akustik bakış açısına göre malzemeler ses iletimini karşılaştırma ve çarpan ses dalgalarını yutma kabiliyetleri açısından karakterize edilir. Sesin frekans ve yayılım tipine göre hava, yapısal (darbe) kaynaklı olarak kullanılacak ses yalıtım sistem ve malzemeleri farklılık göstermektedir. Yalıtım malzemeleri yapıda iki amaç için kullanılabilmektedir. Bunlardan birincisi hacim içindeki sesin dağılımını ve yansımasını kontrol etmek için iç yüzey elemanları, ikincisi ise içeride veya dışarıda oluşan sesin ara bölmeden (duvar vb.) geçen kısmının yalıtımı için panel, duvar veya sandviç sistem elemanı olarak kullanılmasıdır. Ses yalıtımında hacme gelen sesin frekansı ve/veya oktav bandı tespit edilmelidir. Buna göre ağırlıklı oktav bandı üzerinden malzeme seçimi yapılmalıdır [2].

Ses yutuculuk katsayısı yüksek malzemeler genellikle yumuşak ve gözenekli malzemeler olup, çınlama sürelerinin kontrolü, eko kontrolü ve gürültü azaltımı için kullanılır. Aşağıda ses yutucu malzemelerin kullanım alanları ile ilgili kısa açıklamalar verilmiştir.

<u>Çınlama kontrolü</u>

Aşırı derecede çınlayan restoran ya da demir yolu istasyonu gibi mekânlar etrafında ses ekolarının gürültü oluşturduğu ve iletişimi zorlaştırdığı yelerdir. Bu tip mekânlarda

insanlar konuşmalarını yavaşlatır, daha yüksek sesle konuşur ve anlaşılırlığın sağlanması için kelimeleri doğru telaffuz etmeye çalışırlar. Bu tür mekânlarda sadece tavana yerleştirilecek bir ses yutucu malzeme, ses kaynağına olan uzaklığına göre yansıtıcı ses düzeyini 3-10 dB arasında düşürebilir [27].

Eko kontrolü

Ses yutucu malzemeler (genellikle çımlama kontrolü ile birlikte) eko kontrolündede kullanlırlar. Ekolar uzun gecikmiş ses yansımaları olup, hacmin genel çınlamasının üzerinde net olarak duyulabilir. Tekrarlana eko adı verilen küçük hacimlerdeki eko sorunu ses yutucu malzemeler kullanılarak kontrol edilebilir [27].

Hacimlerdeki gürültü azaltımı

Doğru kullanıldığında, ses yutucu malzemeler, bir hacim içerisinde gürültü kontrolündede etkin olabilir. Ancak belirli bir uygulama alanı olup bütün gürültü problemleri için bir çözüm kaynağı değildir. Örneğin bir hacimdeki toplam ses yutuculuğunun her katlanşında gürültü yalnız 3 dB azalır [27].

Ses yutum katsayısı ile iki malzemenin ses yutma özelliklerini ancak belli bir frekans bandı için karşılaştırabiliriz ve birinin diğerinden bu frekans bandında daha iyi olduğunu söyleyebiliriz. Gürültü azaltma katsayısı (NRC), test edilen malzemenin ses yutum kalitesini gösteren tek bir sayı indeksidir. NRC; 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz frekanslarda ölçülen ses yutum katsayılarının aritmetik ortalamasının en yakın değere 0.05'lik yuvarlanması ile belirlenir. Gürültü azaltma katsayısının tanımında dikkate alınan frekans bantları, gürültü kontrolü açısından önemli olan frekans bantlarını kapsamaktadır. Bu nedenle, NRC değeri bilinen iki malzemeden, daha büyük değere sahip olanın, genelde daha iyi ses yutumu sağladığı söylenebilir. NRC değerleri malzeme seçiminde kabaca karşılaştırma yapılmasını sağlayan pratik bir ölçüdür. Bununla birlikte düşük frekans yutuculuğunu önemli bir faktör olmadığı yerlerde (lobiler, genel aktivite alanları) NRC yeterli bir endekstir [36].

Ses yalıtım malzemeleri ses yalıtımı ve gürültü kontrolü açısından büyük faydalar sağlamaktadır. Ancak üretilen yalıtım malzemelerinin tümü benzer özellik taşımamaktadır.

Uygulama açısından incelediğinde, bazı ürünler diğerlerine göre daha uygun olabilmektedir. Akustik açıdan değerlendirildiğinde, sesin nasıl yayıldığının ve malzeme özelliklerinin bilinmesi uygun malzeme seçiminde kolaylık sağlamaktadır. Ses enerjisi, katı bir yüzeye çarptığında yansıyabilir, absorbe edilebilir veya iletilebilir. Bu nedenle sesin karşılaştığı yapı elemanının yani yalıtım malzemesinin özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Ses yalıtımı ve akustik özellikler bu amaçla kullanılacak malzemelerin kütle, sertlik, çok katmanlılık, makroskopik yapı, elastik özellikleri gibi farklı özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu değişkenlere göre ses yalıtımı ve gürültü kontrolü için kullanılacak akustik malzemelerin özelliklerini belirlemek oldukça karmaşık ve uzmanlık gerektiren bir iştir. Malzemelerin daha çok mikro yapısal özellikleri ile ilgilenen bu alanda son yıllarda ciddi araştırmalar yapılmaktadır. Ses yaltım malzemelerinde bulunması gereken özellikleri genel özellikler ve akustik performansı doğrudan etkileyen özellikler olarak ikiye ayırabiliriz.

Genel olarak ses yalıtım malzemesinin yoğunluğu, kalınlı, sertliği, fiziksel, mekanik dayanım, nem, küf, böceklenme ve yanma dayanımı gibi özellikleri de dikkate alınması gereken genel özelliklerdir. Bu özellikleri aşağıdaki şekilde açıklamak mümkündür [2].

Yoğunluk

Yoğunluk malzemenin ses yalıtımını etkileyen önemli bir özelliktir. 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.

Kalınlık

Genel olarak kalın malzemelerin ince malzemelere göre düşük frekanslardaki ses yutumu daha iyi olduğu söylense de malzemenin diğer özellikleri bu durumu tersine dönüştürecek şekilde etki edebilmektedir. Bu durum kalınlık tek başına ana etken olmadığını, malzemelerin diğer özelliklerinin birlikte ele alınması gerektiği sonucuna ortaya çıkarmaktadır.

Sertlik

Sert malzemeler yüksek yoğunluğa sahip olsalar dahi darbe seslerini yalıtma özellikleri yoktur (beton gibi). Malzemenin sert olması değil esnek olması darbe ses yalıtım yeteneğinin artmasını sağlamaktadır.

Fiziksel dayanım

Özellikle yapı elemanlarında kullanılan yalıtım malzemeleri sürekli olarak yüke ve darbeye maruz kaldıkları için zamanla ses yalıtım özelliklerini kaybederler.

Nem ve küfe dayanım

Lifli ya da sentetik malzemelerin neredeyse tamamı nem ve küfe karşı dayanıksızdır. Nem ve küf bakteri oluşturmaları nedeniyle zamanla malzemenin yapısını bozarak, ses yalıtım özelliğinin azalmasına yol açmakla kalmaz, insan sağlığı için de tehlike oluşturur.

Yangın güvenliği

Yangın yalıtımı bakımından cam köpüğü, vermikülit, kalsiyum silikat plakaları, cam yünü, taş yünü, genleştirilmiş perlit tercih edilebilirken, ses yalıtımı için de çabuk alevlenen ve yandığında ortam hava koşullarını zehirli gaz çıkararak değiştiren sentetik ürünler tercih edilmemelidir.

Böceklenme

Her türlü haşeratın yumuşak yapı elemanlarına ulaşması ses yalıtımı başarısız kılacağı gibi sağlıksız ve yaşanılması güç mekânların oluşmasına da neden olacaktır.

2.1.8. Gözenekli ortamda akustik performansa etki eden temel özellikler

Gözenekli malzemelerin özellikleri katı ve akışkan olmak üzere iki farklı faz olarak incelenmektedir. Burada katı faz (iskelet) malzemenin kendisi, akışkan faz ise genellikle hava olarak sınırlandırılan alandır. Ses yutum katsayısının belirlenmesinde katı ve akışkan

fazlar birlikte etkiler. Ses iletim kaybının belirlenmesinde ise havanın malzeme içerisine nufüz etmesi istenmediği için katı faz etkin olmaktadır.

Gözenekli malzemenin akustik performansını anlamak için, gözenekli ortamdaki ses yayılımını yöneten özellikleri bilmek önemlidir. Gözenekli ortamdaki ses yayılımı, gözenekli malzemenin makro yapısına, gözeneklerdeki havanın özelliğine ve katı iskelet mekanik özelliklerine bağlı olarak düzenlenir. Bu parametrelerin anlam ve fiziksel kökeninin ayrıntılı tanımı aşağıda özetlenmiştir.

Makroskopik özellikler

Makroskopik özellikler olarak bilinen beş parametre, gözenekli yapının (iskelet) geometrisini ve gözenekli ortamdaki ses yayılımındaki karmaşıklığı tanımlar. Bu özellikler aşağıdaki gibidir:

Gözeneklilik

Malzemeler iç yapısındaki gözenekler dış yüzeye kapalı, birbiriyle olan bağlantısı duvarlarla ayrılmışsa kapalı gözenekli, yapıdaki gözenekler dış yüzeyine açık, birbiriyle bağlantılı bir şekilde bulunuyorsa açık gözenekli olarak adlandırılırlar. Akustik malzemeler için gözeneklilik, yaklaşık olarak 0,70-0,99 arasındadır. Malzemelerin açık gözeneklere sahip olması, ortamın ses yutum performansını arttırırken, kapalı gözeneklere sahip olması titreşimleri sönümlemesini sağlayarak darbe sesleri yalıtımında etkinliğinin artmasını sağlar. Gözenek oranı (ϕ), gözenek hacmininin (akışkan fazing kapladığı hacim-V_a), malzemenin toplam hacimine (V_t) oranı olarak tanımlanan fiziksel bir özelliğidir. Bu durumda gözeneklilik aşağıdaki Eş. 2.2 ile tanımlanır.

$$\phi = \frac{V_a}{V_t} \tag{2.2}$$

Kıvrımlılık

α_∞, gözenekli malzemenin ortam üzerinden doğrudan akışını ne kadar iyi engellediğini tanımlayan fiziksel bir özelliktir. Kıvrımlılık, malzeme içindeki birbirine bağlı gözeneklerin oluşturduğu ses yayılım kanallarının uzunluğunun malzemenin kalınlığına

oranlanmasıyla elde edilir [35]. Yüksek kıvırımlılığa sahip bir malzemede ses enerji dağılımı yüksektir. Kıvrımlılık, katı ve sıvı fazlar arasındaki atalet bağlantısına neden olur.

Sipesifik hava akış öz direnci

σ, malzeme içerisinden bir birim akışı zorlamak için gereken basınç düşüşüdür ve gözenekli materyal içindeki yayılmakta olan ses dalgalarının viskoz kayıplarını ifade eder. Farklı gözenek yapısına sahip malzemeler için akış direnci, ses yutumu için en önemli parametredir. Akış direncinin birimi Ns/m^4 veya rayls/m'dir.

Viskoz karakteristik uzunluk

Λ (μm), viskoz kayıplarla ilgili gözeneklerin ortalama makroskopik boyutudur ve gözenekli yapının küçük gözeneklerinin ortalama bir yarıçapı olarak görülebilir.

Isıl karakteristik uzunluk

Λ' (μm) ısıl kayıplarla ilgili gözeneklerin ortalama makroskopik boyutudur ve gözenekli yapının daha büyük gözeneklerinin ortalama bir yarıçapı olarak görülebilir.

Hava özellikleri

Gözeneklerdeki hava ideal bir gaz olarak kabul edilebilir. Hava yoğunluğu ρ_o (kg/m^3), gözenekdeki hava akış hızı v_h (m/s), havanın viskozitesi η (Pas), Prandtl sayısı Pr ve özgül ısı oranı cp (J/kgK) hava özelliklerini tanımlar.

İskeletin mekanik özellikleri

Biot teorisini takiben, izotropik açık gözenekli elastik gözenekli malzemenin çerçevesi üç makroskopik elastik özellik ile tanımlanır. Bu özelilkler; kayıp faktörü ile birlikte kesme modülü (G), young modülü (E) veya Poisson oranı (ν) ve katı çerçevenin yoğunluğu (ρ) özelliklerinin ikisinden oluşmaktadır. Bu özellikler genellikle iskeletin viskozitesi nedeniyle karmaşık ve frekansa bağlıdır [37].

Ayrıca ses yutum katsayısı genellikle frekans ile artar. Ses dalgalarının yutucu özellikteki yüzeye çarptıklarında yaptıkları açı olarak tanımlanan sesin gelme açısı; ses yutum katsayısını etkilemektedir.

Çizelge 2.3'de gözenekli bir yapıya sahip malzemelerin akustik performans parametreleri olarak ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybını doğrudan etkileyen özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Gözenekli ortamda akustik performansa etki eden özellikler [10]

Makroskopik özellikler	Mekanik özellikler	Gözenekli yapı içerisindeki hava özellikleri	Ortamdaki ses özellikleri
Hava akış öz direnci Gözeneklilik Kıvrımlılık Termal karakteristik uzunluk Vizkoz karakteristik uzunluk	Kayıp faktörü Kayma modulü Elastisite modulü Poisson oranı	Havanın yoğunluğu Havanın viskozitesi Özgül ısı oranı Prandtl sayısı Hava akışı hızı	Gözenek içersindeki sesin hızı Gözenek içersindeki sesin frekansı Sesin dalga boyu Sesin gelme açısı

Akustik performansın değerlendirilmesi

Yapılan çalışmalar malzemelerin akustik performansını etkileyen özellikler değişmese dahi kullanılan ölçüm metotlarının da farklı sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Malzemelerin ses yutum ve yalıtım performansı bir dizi yolla ölçülebilir. En yaygın olarak kullanılanlar; hava kaynaklı ses yalıtımı için laboratuvarda bir empedans tüp içinde bir düzlem dalga alanında küçük numuneler kullanılarak veya darbe sesi için bir çınlama odasında dağınık ses alanında gerçek boyutlu numuneler kullanılarak yapılan ölçümlerdir.

Bu yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar da biribiri ile karıştırılmamalıdır. Bazı malzemelerde yapılan ölçümlerde benzer sonuçlar elde edilebilirken birçok malzemede ölçüm sonuçlarının birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzemelerin iç yapısındaki farklılıklar ve malzemeye gelen ses dalgası enerjisinin tek yönlü veya dağınık olup olmamasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 2.4'de ses yalıtımının değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin bir listesi verilmiştir.

Çizelge 2.4. Ses yalıtımının değerlendirilmesi ile ilgili yöntemlerin listesi [10]

Değişken	Ölçüm birimi	Standart	Not
Ağırlıklı ses azaltma indeksi, R_w	dB	ISO 717-1 [38]	Tek sayı, çınlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Görünür ağırlıklı ses azaltma indeksi, R'_w	dB	ISO 717-1 [38]	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses Azaltma İndeksi, R	dB	ISO 10140 [39] EN 12354-1 [40]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune Tahmin
Görünür ses azaltma indeksi, R′	dB	ISO 16283-1 [41]	Yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses iletim kaybı, TL	dB	Standart'ı bulunmamaktadır.	Empedans tüpü, küçük numuneler
Ağırlıklı darbe sesi yalıtımı iyileştirme indeksi, ΔL_W	dB	ISO 717-2 [42] EN 12354-2 [43]	Tek sayı, çınlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune Tahmin
Darbe sesi yalıtımı iyileştirme indeksi, ΔL	dB	ISO 10140 [39]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ağırlıklı standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, $L_{n,w}$	dB	ISO 717-2 [42]	Tek sayı, çınlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, L_n	dB	ISO 10140 [39] EN 12354-2 [43]	Çınlama odası, gerçek boyutlu örnek Tahmin
Ağırlıklı görünür standartlaştırılmış darbe ses basıncı seviyesi, $L'_{n,w}$	dB	ISO 717-2 [42]	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Görünür standartlaştırılmış darbe ses basıncı seviyesi, L'_n	dB	ISO 16283-2 [44]	Yerinde, gerçek boyutlu numune
Dinamik sertlik	MN/m^3	ISO 9052-1 [45]	Laboratuvar, küçük numuneler

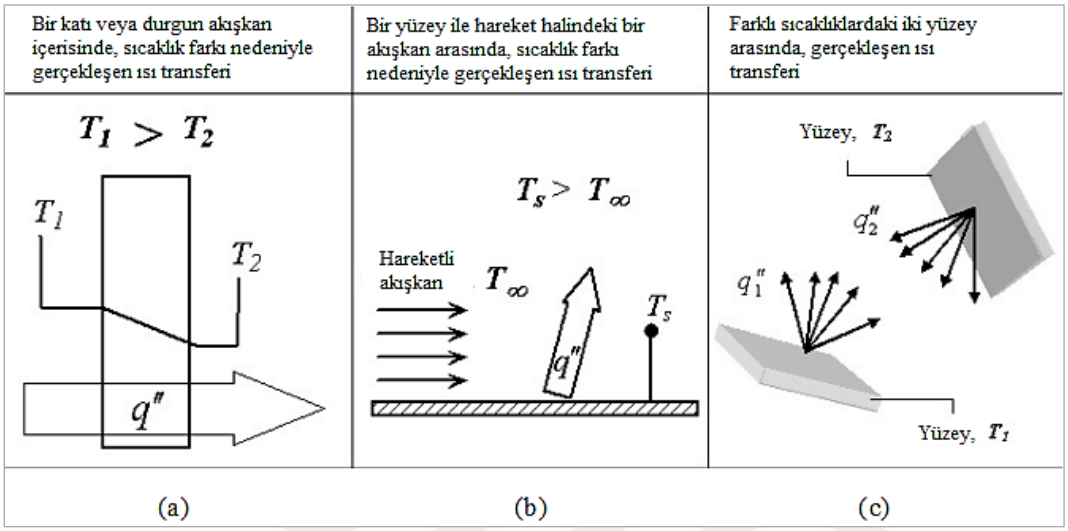
Çizelge 2.5'de ses yutum özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi görülmektedir. Listedeki tüm parametreler boyutsuz büyüklüklerdir.

Çizelge 2.5. Ses yutumun değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi [10]

Değişken	Standart	Not
Ses yutum katsayısı, α	ISO 354 [46]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ASTM C423-09a [47]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ISO 10534-2 [48]	Empedans tüpü, küçük numuneler
Gürültü azaltma katsayısı, NRC	ASTM C423-09a [47]	Tek sayı, çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum ortalaması, SAA	ASTM C423-09a [47]	Tek sayı, çınlama odası, gerçek boyutlu numune

2.2. Gözenekli Ortamın Isı İletim Katsayısı

Malzemelerin ısı akışını kontrol eden üç tip ısı transfer mekanizması vardır. Şekil 2.9'da gösterilen bu mekanizmalar (a) iletim, (b) taşınım ve (c) radyasyondur.



Şekil 2.9. (a) İletim, (b) taşınım ve (c) ışınım ısı transfer modları [49]

Yalıtım malzemesinin bileşen parçacıkları enerjinin aktarıldığı fiziksel temas halindeyken iletim gerçekleşir. İletim, moleküllerin elastik çarpmasından kaynaklanır. Şekil 2.9a'da açıklandığı gibi, ısı akışı q_{iletim} (W/m^2) x yönünde ısı aktarım hızıdır ve bu yönde $\frac{(T1-T2)}{x}$ sıcaklık gradyanı ile orantılıdır. Herhangi bir konumdaki sıcaklık gradyanı, malzeme yüzeyi boyunca birim mesafe başına sıcaklık değişimi olarak tanımlanabilir. Malzeme boyunca ısı akışı, (1) malzemenin sıcaklık gradyanına, (2) malzemenin kesit alanına, (3) malzemesine hammaddesine bağlıdır. Isı akışı, sıcaklık gradyanı ve kesit alanı ile orantılı olduğu için, orantı sabiti k cinsinden ısı akış denklemi, malzemenin ısı iletim katsayısını verir. Orantı sabiti k (W/mK), ısı iletim katsayısı olarak bilinen malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Isıl iletim katsayısı k ayrıca: dT/dx sıcaklık gradyanının neden olduğu ısı akısı Q̇ (birim alandan birim zamanda akan ısı miktarı) olarak da tanımlanabilir.

Bir boyutlu ısı akışı için iletim ile birim zamanda transfer edilen ısı miktarını hesaplamak için Fourier Denklemi Eş.2.3 ile tanımlanır.

$$q_{iletim} = -k\frac{T_1-T_2}{X} \tag{2.3}$$

Burada A, ısı geçişine dik malzemenin enine kesit yüzey alanıdır. T_1 ve T_2 sırasıyla giriş ve çıkış sıcaklığıdır (k). x kalınlık metredir.

Taşınım, yalıtım malzemesinin bileşen parçacıklarını, gazını veya akışkanını hareket ettirerek enerji transferinin bir sonucu olarak gerçekleşir. Şekil 2.9b'de düz plaka üzerinde akan bir akışkandan ısı transferi görülmektedir. Newton yasasına göre taşınımla ısı transferini aşağıdaki Eş.2.4 ile tanımlanmıştır.

$$q_{taşınım} = h(T_1 - T_2) \tag{2.4}$$

Burada $q_{taşınım}$ ısı transfer hızı (W/m^2), h ısı taşınım katsayısı ($W/m^2.K$), Ts yüzey sıcaklığı (K) ve T_∞ serbest akış akışkan sıcaklığıdır (K)

Işınım, bir cismin elektromanyetik dalgaların yoluyla yaydığı enerjidir. İletim veya taşınımdan farklı olarak, bir aracı ortam olmadığında da ısı transferi ışınım ile gerçekleşebilir (Şekil 2.9c). Bir yüzeyden ışınım ile ısı transferi Stefan-Boltzmann Kanunu tarafından tanımlanan Eş.2.5 ile belirlenir [50].

$$q_{ışınım} = \sigma_{sb}\, \varepsilon\, (T_1^4 - T_2^4) \tag{2.5}$$

Burada σ_{sb} Stefan-Boltzmann sabiti ($5.67x10^{-8}$ $W/m^2.K^4$), ε yüzey yayıcılığı, bir yüzeyin siyah bir cisme (ε=1) göre enerjiyi ne kadar verimli yaydığını gösterir ve $0 \leq \varepsilon \leq 1$ aralığındadır.

2.2.1. Metalik köpüklerde ısı iletim katsayısı

Bir malzemenin ısı iletme kabiliyeti, ısıl iletim katsayısı ile ölçülür. Kapalı gözenekli metal köpükler, gözenekli malzemeler arasında diğer fonksiyonel özellikleri ile birlikte düşük ısıl iletim katsayısı değerleri ile ısı yalıtımı için kullanılabilen bir malzemedir.

Metal köpüklerdeki ısı akışını sınırlamak için birkaç faktör birleştirebilir: katı fazın düşük hacim oranı (gözeneklilik); taşınım ile ısı transferini neredeyse durduran ve gözenek duvarlarında tekrarlanan yutum ve yansıma yoluyla ışınım ile ısı transferini azaltan küçük gözenek boyutu ve gözeneklerdeki gazın düşük ısı iletim katsayısı [49].

Alüminyum köpüklerde ısı iletimi katı ve akışkan faz arasında gerçekleştiği için, ısı iletim katsayısı, etkin ısı iletim katsayısı (EIK) olarak adlandırılır. Bu nedenle, kapalı gözenekli köpüğün, EIK'sı ısıyı akışkan akışı olmadan gaz (hava) ve katı (alüminyum) fazdan ısıyı iletme yeteneğini gösteren bir özelliktir.

Köpüklerin EIK'sı; katı fazın (matris malzeme) ısı iletimi (k_m), gözenek içindeki akışkan gaz yoluyla ısı iletimi (k_g), katı matris ve akışkan dolu gözenekleri arasındaki taşınım (k_t), gözenek duvarları ve gözenek boşlukları boyunca ışınım ($k_ı$) dört farklı faz göz önüne alınarak hesaplanabilir [51].

Bununla birlikte uygulamada metal köpük gözeneklerin çapı 5 mm'den az olduğunda matris malzeme ile akışkanın gözenekleri arasındaki ısı taşınımı göz ardı edilir. Ayrıca gözenekli malzemelerde, matrisin ısı iletim katsayısı 100 W/mK'den büyükse, ışınım ile ısı transferi 300 ℃ ila 530 ℃ aralığında ısı iletiminin yaklaşık yüzde 10'u olduğu için ihmal edilir. Bu nedenle, kapalı gözenekli alüminyum köpüğün EIK'sı üzerinde esas olarak, matris malzemenin ısı iletim katsayısı ve gözenek içindeki akışkanın (hava) ısı iletim katsayısı belirleyici faktörler olarak kabul edilir [52].

Katı fazda iletim

İletim yoluyla ısı transferi, bir cismin sıcak bir bölümünden aynı cismin daha serin bir parçasına veya farklı sıcaklıklara sahip iki malzemenin yüzeyleri temas halindeyken ana ısı transferi şeklidir. EIK, malzeme yapısı (köpük yoğunluğu, gözenek boyutu, boşluk payı) ve iç ortam ile değişir. Gözenekli bir malzemede, bu mekanizma ile taşınan ısıl dirençler nedeniyle azalmaktadır. İletim, numune boyunca ısı akış hızı sağlayan A kesit alanına güçlü bir şekilde bağlıdır. Katı kesit alanının azaldığı yerlerde ısı akışı dirençle karşılaşır. Bu nedenle, katı içerisindeki iletimle taşınan ısı, katı maddenin kesit alanını düşürerek azaltılabilir. Ayrıca, gözeneklerin kıvrımlı şekillere sahip olması durumunda daha da azalmalar mümkün olabilir [49,51].

Al köpüğün, enine kesitinin sadece küçük bir bölümü (gözenek duvarları), ısı iletim katsayısına sahip metal alaşımdır. Diğer yapısı, alüminyumdan çok daha düşük bir ısı iletim katsayısına sahip olan gazla (genellikle hava) dolu gözeneklerdir. Köpüğün

yoğunluğu, duvarların gözeneklere oranını tarif eder. Bu nedenle, gözenekli yapı, herhangi bir dökme malzemeden çok daha düşük ısı iletim katsayısına sahiptir [51].

Gaz fazında iletim

Durgun gazda ısı transferi genellikle çok yavaştır. Bununla birlikte, diğer ısı iletim mekanizmalarının baskılandığı düşük yoğunluklu ısı yalıtım malzemelerinde değerlendirilmesi gerekir. Birçok yüksek performanslı yalıtım malzemesinin içi boşaltılır ve gözenekleri doldurmak için düşük ısı iletim katsayılı gazları kullanır. Bu yöntemler ısı akışını azaltsa da, ışınımın önemli bir rol oynamadığı düşük sıcaklıklarda etki yaparlar. [49].

Taşınım

Taşınım, farklı sıcaklıklarda bir yüzey ve hareketli bir akışkan arasında gerçekleşen ısı transferidir. Herhangi bir akışkan ısındığında taşınım gerçekleşir, çünkü sıcak akışkan ısıl genleşmeye bağlı olarak soğuk akışkandan daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle sıcak akışkan, çevresindeki soğuk akışkan tarafından taşınım akımlarına neden olarak yukarı doğru itilir. Taşınımla ısı geçişi, akışın türüne göre zorlanmış ve doğal taşınım olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Doğal taşınım akışkan içerisindeki sıcaklık değişiminin ortaya çıkardığı yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti ile oluşur. Zorlanmış taşınım, harici bir kaynağın gazın hareketini başlattığı durumlarda mümkündür. Bu ısı değiştiricisinde kullanılan metalik köpüklerde oluşur, ancak yalıtım malzemesi olarak kullanılan köpüklerinde görülmez [49,53].

Köpüklerde, gözenek büyüklüğü 10 mm'den fazla çapta olduğunda taşınım önem kazanır, çünkü gözenek içindeki akışkan parçacıkları hareket ederek ısıyı aktarır. Hâlihazırda kullanılan bir çok alüminyum köpük, 10 mm'den küçük gözenek boyutlarına sahip olduklarından, taşınım katkısı ihmal edilebilir düzeydedir [53].

Işınım

Işınım, iletim ve taşınımın aksine herhangi bir taşıyıcı ortam bulunmadığında elektromanyetik dalgalar yoluyla enerjinin transferidir. Metalik köpüklerde, gözenek

boyutları 10 mm'den küçük ve 700 K'nın altındaki sıcaklıklarda ışınım ile ısı transferi güvenli bir şekilde göz ardı edilebilir [54].

Isı transferi kombinasyonu

Gözenekli bir sistemde, ısı akış değerlerini hesaplamak için birçok faktör düşünülmelidir. EIK olarak tanımlanmış olan katı faz ve kapalı gözeneklerdeki gaz üzerinden ısı iletiminin kombinasyonu, karmaşık bir ısı akışı oluşturur. EIK, Eş. 2.6'da verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$EIK = k_m + k_g + k_t + k_ı \tag{2.6}$$

Burada, k_m katı içerisindeki iletimden kaynaklı ısı iletim katsayısı, k_g gaz kaynaklı ısı iletim katsayısı, k_t taşınım nedeniyle ısı iletim katsayısı ve $k_ı$ ışınım ile ısı iletim katsayısıdır.

Metal köpüklerde, EIK yoğunlukla değişir ve gözeneklerde bulunan havanın ısı iletim katsayısından daha fazladır. EIK'yı azaltmanın yolu, gözeneklerdeki havayı, triklorofloremetan (CCl_3F) gibi daha düşük ısı iletim katsayısına sahip bir gaz ile değiştirmektir. Küçük gözeneklerde ışınım ile ısı transferinin etkisi azdır ve kısmen çapı 10 mm'den daha büyük olan gözenekler için gözeneğin ışınıma başlamasından kaynaklanmaktadır. Gözenek büyüklüğünün yanı sıra ölçülebilir bir parametre olarak gözeneklilik ısı transferini etkileyen önemli unsurlardan biridir. Ayrıca sıcaklık, ısı iletim katsayısını etkileyebilecek bir diğer faktördür. Sıcaklık düştükçe katılar ve gazlar yoluyla ısı iletim katsayısı azalır. Işınım düşük sıcaklıklarda daha az etkili olur. Bu nedenle, köpüklerdeki ısı transferi sıcaklığı düşürdükçe hızlı bir şekilde azalır [51].

2.2.2. Isı iletim katsayısı ölçüm teorisi

Al esaslı köpük malzemelerin EIK ölçümü ısı akış ölçer (IAÖ) cihazında Fourier ısı iletim denklemi ile belirlenmektedir. Tek boyutlu ısı iletimi Eş.2.7 ile verilmiştir.

$$\dot{Q} = kA\frac{\Delta T}{l} \tag{2.7}$$

Burada, $\dot{Q}$ (W) ısı akısı, k (W/mK) ısıl iletim katsayısı, A (m^2) alan, ΔT (K) sıcaklık farkı, l (m) numune kalınlığını ifade etmektedir.

Bir Al köpük numunenin ısıl direnci aşağıdaki verilen Eş.2.8 ve Eş.2.9 ile hesaplanabilir.

$$R = \frac{l}{kA} \tag{2.8}$$

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = R = \frac{T_u - T_m}{\dot{Q}} \tag{2.9}$$

Burada R, numunenin kalınlığı boyunca ısıl direncidir.

EIK ölçüm cihazında ısı akısı dönüştürücüsü $\dot{Q}$ değerini ölçer ve üst plaka ve alt plaka arasında sıcaklık farkı elde edilir. İki katı plaka yüzeyi birbirlerine doğru bastırıldıklarında iyi malzeme teması sağlanır fakat girinti çıkıntılarda hava boşlukları kalır ve bir ara yüzey oluşur. Bu ara yüzey havanın düşük iletkenliği sebebiyle bir yalıtım görevi görür ve ısı geçişine karşı bir miktar direnç gösterir. Birim ara yüzey başına bu direnç; ısıl temas direnci, Rs olarak adlandırılır. Termal dengedeyken (kararlı hal), üst plaka ve alt plaka arasındaki test numunesinin ısıl temas direnci (Rs) Fourier ısı akışı denklemine göre Eş.2.10 ile aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Rs = \left[\frac{(T_u - T_m)}{\dot{Q}}\right] - R_{int} \tag{2.10}$$

Burada;

R_s =Test numunesinin ısıl direnci (m^2 K/W);

T_u = Üst plaka yüzey sıcaklığı (°C);

T_m = Alt plaka yüzey sıcaklığı (°C);

$\dot{Q}$ = Test numunesi boyunca ısı akışı (W/m^2);

R_{int} = Malzeme ve yüzey plakaları arasındaki toplam arayüz direnci (m^2 K/W).

Al köpüğün ısıl direnci Eş.2.11 ile tanımlanır.

$$R_S = \frac{l}{k_k} \tag{2.11}$$

Burada:

l = Malzeme kalınlığı (m);

k_k = Al köpüğün ısı iletim katsayısı (W/m K).

Ara yüzey ısıl direnç R_{int}'i Eş.2.10'a dahil edilmelidir çünkü; HFT, numunenin kendisindeki gerçek sıcaklık düşüşünü ölçmez, bunun yerine numune ile temas halindeki üst ve alt yüzey plakaları arasındaki sıcaklık farkını ölçer. Numuneden geçen ısı akışı, numunenin hemen altında bulunan bir dönüştürücü (HFT) ile ölçülür. Isı akışı, Eş.2.12 ilereferans kalorimetresi boyunca sıcaklık farkı ölçülerek belirlenir.

$$\dot{Q} = N\ (T_m - T_L) \tag{2.12}$$

Burada;

$\dot{Q}$ = Isı akışı dönüştürücü çıkışı (W/m^2)

N = Referans kalorimetre ısı transfer katsayısı (W/m^{2}K);

T_m = Alt plaka yüzey sıcaklığı (℃);

T_L = Alt ısıtıcı sıcaklığı (℃);

Al köpük numunelerin ısıl direnci, Eş. 2.10 ve Eş. 2.12 birleştirilerek aşağıda verilen Eş. 2.13 veya Eş. 2.14 ifadeleri ile belirlenir.

$$R_s = F.\left[\frac{(T_u - T_m)}{(T_m - T_L)}\right] - R_{int} \tag{2.13}$$

veya

$$Rs = F.\left[\frac{(\Delta T_s)}{(\Delta T_r)}\right] - R_{int} = F.T_{RA} - R_{int} \quad (2.14)$$

Burada:

F = Isı akış dönüştürücü kalibrasyon faktörü /orantı sabiti (m^2 K/W);

ΔT_s= Numune boyunca sıcaklık farkı (℃);

ΔT_r = Referans kalorimetre boyunca sıcaklık farkı (℃);

T_{RA}= $\Delta T_s/\Delta T_r$ (℃/℃).

İdeal şartlar altında, test numesinin dış yüzeyi boyunca ısı kaybı veya kazanç olmadığı zaman, F faktörü referans kalorimetre ısı transfer katsayısı (N)'nin, tersidir. Eş. 2.13 veya Eş. 2.14'te verilen F ve R_{int} değerleri ölçüm cihazının ısı iletim katsayısı bilinen referans bir malzeme kullanılarak kalibrasyon işlemiyle elde edilir.

Son olarak, kalınlığı ölçülen Al köpük numunelerin ısı iletim katsayıları ısıl direnç değerinden Eş.2.15 kullanılarak hesaplanır.

$$k_k = \frac{l}{R_s} \quad (2.15)$$

2.3. Gözenekli Ortamda Ses Yutumu ve Ses İletim Kaybı

Ses yutum ve ses iletim kaybı sağlayan malzemelerin uygulama ve tasarımları anlamak için öncelikle sesin yayılımı konusundaki temel terminoloji ve matematik gözden geçirilmelidir. Bu sebeple, bu bölümde ses ile ilgili fiziksel özelliklerin yer aldığı temel kavramlar ve ses ölçümleri ile ilgili paremetrelere yer verilmiş, gözenekli ortamda ses yutmu ve ses iletim kaybı ile ilgili teorik model ve denklemlere ele alınmıştır.

2.3.1. Ses ile ilgili temel kavramlar

Ses, dalgalar halinde yayılan bir enerji şeklidir ve canlıların işitme organları tarafından algılanabilen hava, su ya da benzeri bir ortamdaki basınç değişimi olarak tanımlanır. Sesin

tanımlanmasında yararlanılan sesin yayılma hızı, frekans, periyot gibi kavramlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Sesin yayılma hızı

Ses bir ortam içinde titreşimlerden oluşan fiziksel bir hareket şeklinde yayılır. Durgun bir suya atılan taşın su yüzeyinde oluşturduğu dalgalanmaların yayılması durumuna benzetilen ses dalgaları ortam moleküllerini sıkıştırıp gevşeterek ses enerjisini çevreye dağıtır ve yayılır. Ses dalga hareketlerinin ortam içinde zaman fonksiyonuna göre ilerlediği hıza sesin yayılma hızı (c) denir. Birimi m/s'dir. Sesin yayılma hızı, ortamla ilişkili olup, ses katı- sıvı- gaz ortamlarına göre farklı yayılma hızına sahiptir.

Frekans

Bir otam içerisinde sesi meydana getiren tirreşimlerin bir saniye süredeki yer değiştirme ya da salınım sayısına verilen isimdir. Birimi ise Hertz (Hz)'dir. 1 Hz saniyede 1 titreşim anlamına gelmektedir. İnsanların işitme frekans aralığı 20 Hz ile 20.000 Hz arasındaki alanı kapsamaktadır. Saniyedeki titreşim sayısı arttıkça diğer bir deyişle frekans yükseldikçe ses incelir.

Periyot

Titreşen bir nesnenin (ya da sistemin) aynı noktadan aynı yönde ard arda iki geçişi ile tamamlanan olaya, ya da bu olayın süresine periyot denir. Devir veya devir süresi diye de adlandırılr. Birimi saniye (s)'dir.

Sesin dalga boyu

Hava gibi ortamlarda ses dalgalar halinde yayılır. Titreşimlerin bir devri sırasında sesin aldığı yola dalga boyu veya yayılım sabiti denir. λ (lambda) ile gösterilir. Birimi metredir. Dalga boyu, Eş.2.16'daki ifade ide ile temsil edilmektedir ve devir sayısı (periyot) ve ses yayılma hızı ile çarpılarak ya da bu hız frekansa bölünerek hesaplanır. Dalga boyu, ses hızı, periyot ve frekans arasındaki bağlantılar aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad veya \qquad \lambda = c.T \tag{2.16}$$

Burada;

f: Frekans (Hz)

T: Periyot (s)

λ: Dalga boyu (m)

c: Ses hızı (340 m/s)

Genlik

Bir titreşim hareketinde ortam elementlerinin, titreşim hareketleri ile gidip geldikleri uzaklığa, genlik adı verilir. Genlik, bir ses dalgasının tepesinden çukuruna kadar olan düşey uzaklığın yarısıdır. Örneğin bir piyano tuşuna hızlı vurmakla o tuşla ilgili tel daha fazla titreşir, yani genliği artar ve ses daha kuvvetli çıkar. Ses şiddetinin azlığı ya da çokluğu aynı zamanda genliğin azlığını ya da çokluğunu ifade eder. Ses şiddeti arttıkça genlikte artış gösterir. Birimi ise (m)'dir [55].

Partikül hızı

Harmonik bir titreşimde, akustik kaynağın yüzeyi genişleyip daralarak yüzeyindeki hava partiküllerini titreştirir. Titreşen hava partikülleri, yanındaki hava partikülüne dokunarak bu titreşimi iletir ve bu işlem kaynağın enerjisi tükenene kadar devam eder. Bu şekilde dalga yayınımı oluşurken, partiküller kendi referans eksenlerinde bir ileri bir geri hareket yaparak titreşirler. Bu yayınımın (dalga hareketinin) hızı ses hızı olarak adlandırılırken, her bir partikülün titreşim hızı da partikül hızı olarak adlandırılır [56]. Partikül hızı (U) o noktadaki ses basıncı ile ortamın karakterine (yoğunluk-ρ ve ses hızı-c) bağlı olarak Eş.2.17'de verilen şekilde ifade edilir.

$$U = \pm \frac{p}{\rho c} \tag{2.17}$$

Akustik empedans

Malzeme yüzeyindeki ses basıncının, ses partikül hızına oranı, malzemenin akustik empedansı olarak adlandırılan terimi vermektedir. Ns/m^3 ya da MKS rayl birimi ile ifade edilir. Akustik empedans farklı ortamlar içersinden ses dalgalarının ilerlemesi sırasında, yüzey tarafından gösterilen direnci ifade etmektedir. Akustik empedans genellikle karmaşık sayı olup gerçel kısım, enerji kaybını ifade ederken, imajiner kısım ise faz değişiklikleriyle ilgilidir ve yüzey üzerinden yansıyan ses dalgasının genlik ve faz değişimleri hakkında bilgi verir [57].

Oktav bantları

İnsan kulağı yaklaşık olarak 16-20000 Hz arasındaki seslere karşı duyarlıdır. Bu frekans değişik kaynaklarda 16-16000 Hz ya da 20-20000 Hz olarak verilmektedir. Kulağın en hassas olduğu frekans ise 3000 Hz'dir. Normal bir konuşma 200-10000 Hz frekans aralığını kapsar. Konuşmanın anlaşılabilir olması için 1000-2500 Hz aralığındaki frekanslar yeterlidir.

İncelenmesi gereken frekans aralığı çok geniş olup, sabit genişlikteki bantların kullanılması durumunda çok uzun analiz süresi gerekebilir. Bu nedenle, ses analizlerinde incelenecek olan frekans aralığı oktav adı verilen kısımlara bölünür. Bir oktav bandında, bandın üst sınır değeri, alt sınır değerinin iki katıdır ve her bandın 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, üst sınır değeri f_2 ve merkez frekans f_0 olmak üzere aşağıda verilen Eş. 2.18'deki ifadeyle temsil edilmektedir.

$$f_0 = \sqrt{2} f_1 = f_2/\sqrt{2} (Hz) \tag{2.18}$$

Bant genişliği ise alt ve üst sınır değerleri arasındaki fark olarak Eş.2.19 ile temsil edilir.

$$bw = f_2 - f_1 (Hz) \tag{2.19}$$

Dar bant analizleri için genellikle 1/3 oktav analizi yapılmaktadır. Bu analizler bir oktavlık aralık üçe bölünmektedir [32].

Frekans spektrumu

Bir gürültünün oktav ve 1/3 oktav bantların her birinde sahip olduğu ses basınç düzeylerinin frekanslara göre değişiminin grafik üzerinde gösterilmesidir.

2.3.2. Ses Ölçümlerinde kullanılan temel parametreler

Ses ölçümlerinde temel olarak üç parametre rol almaktadır. Bunlar, ses basıncı, ses gücü ve ses şiddetidir. Bu kavramlarla ilgili tanımlara aşağıda kısaca yer verilmiştir.

Ses basıncı ve ses basınç düzeyi

Hava partiküllerinin ses dalgasına bağlı olarak titreşmesi sonucu oluşan atmosferik basınçtaki dalgalanmaya ses basıncı denir. Ses basıncının birimi Pa (N/m^2)'dır. İnsan kulağının işitme alt sınırı, $2x10^{-5}$ Pa; üst sınırı ise yaklaşık olarak 20 Pa'dır. Bu aralığın çok geniş olmasından dolayı ses, desibel (dB) denilen logaritmik bir büyüklük ile ölçülür. Desibel (dB) ile ölçülen büyüklükler düzey olarak adlandırılır.

Ses kulak zarıyla temasta bulunan havanın basıncının değişmesiyle algılandığından, bir ses kaynağının ses gücünden daha çok, belli bir noktada yarattığı ses basıncı önemlidir.

Ses basınç düzeyi aşağıdaki Eş.2.20 ile tanımlanır.

$$L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0} (dB) \text{ veya } L_p = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} (dB) \quad (2.20)$$

Burada p ses basıncının ortalama değerinin karekökü (Root Mean Square [rms] değeri), P_o ise uluslararası referans basıncı olarak kabul edilen 20 mikropaskal'dır. 20 mikropaskal değerinin seçilme nedeni; ortalama genç bir yetişkinin, frekansı 1000 Hz olan bir ses dalgasını duyabilmesi için en az $20x\ 10^{-6}$ Pa değerinde bir basıncın gerekmesidir.

Bu nedenle 1000 Hz'deki duyma eşiği referans alınmıştır. Ses basıncı düzeyinin tanımında basınçların değil de basınçların karelerinin oranının kullanılma nedeni, dB biriminin genellikle güç oranları için kullanılması ve gücün, basıncın karesiyle orantılı olmasıdır [32].

Ses gücü ve ses gücü düzeyi

Bir kaynaktan birim zamanda yayılan ses enerjisine ses gücü veya akustik güç denir. Birimi Watt'tır. Kaynağın yaydığı sesin karakteristik bir ölçüsüdür. Ses gücünün düzeyine ise ses gücü düzeyi L_W bir kaynağın ses gücü düzeyi, adı verilir. Bu tanıma göre, ses gücü W olan bir kaynağın ses gücü düzeyi Eş.2.21 ile temsil edilir.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \tag{2.21}$$

Burada, $W_O = 10^{-12}$ olup uluslararası referans gücüdür. Bir makinenin ses gücü, makinenin toplam gücünün ses olarak yayılan kısmıdır ve toplam güce göre çok küçüktür. Ses gücü düzeyi bilinen bir kaynağın ses gücü, eşitliğinden belirlenebilir. Ses gücü düzeyi bilinen bir kaynağın ses gücü, aşağıda verielen Eş. 2.22 ile bulunur.

$$W = 10^{-12} x 10^{\frac{L_W}{10}} \tag{2.22}$$

Ses şiddeti ve ses şiddeti düzeyi

Bir noktasal kaynaktan yayılan ses dalgası, serbest alanda başka bir ses kaynağı ya da yansıtıcı yüzeyler olmaksızın giderek büyüyerek küresel olarak yayılır. Ses alanı içerisinde verilen bir noktada belirli bir yayılım doğrultusu içindeki dik bir birim alandan aktarılan ses enerjisi miktarına "ses şiddeti" denir. Birimi W/m^2 olup (I) ile ifade edilir. Vektörel ve ölçülebilir bir büyüklük olup kaynaktan olan uzaklık arttıkça azalır. Ses şiddeti uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Ses şiddeti; ses gücünün toplam küresel alana bölünmesi ile bulunur [27]. Bir sesin, kaynağının bulunduğu ortamın akustik ve geometrik özellikleriyle, kaynaktan olan uzaklığa bağlı değişen bir özelliktir. Ses şiddeti, birim alana gelen ses enerjisinin (I) değeridir ve dB ile gösterilir ve aşağıdaki Eş. 2.23 ile tanımlanır.

$$I = \frac{W}{A} (W/m^2) \tag{2.23}$$

Ses şiddetini ölçmek zordur fakat ses şiddeti ile ses basıncı arasındaki, düzlemsel dalgalar için verilen ve kaynaktan uzakta olmak koşuluyla diğer dalga tipleri için de geçerli olan; Eş. 2.24 kullanılarak hesaplanabilir.

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \tag{2.24}$$

Bu bağıntıdan yola çıkılarak, dağınık alanda ve serbest alanda ses şiddetinin ses basıncının karesi ile orantılı olduğunu sonucuna varılır. Ses şiddeti düzeyi, Eş.2.25'de verilen ifade ile tanımlanır.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}(dB) \tag{2.25}$$

Burada; (I_0)=İşitilebilen en zayıf ses enerjisi olup 10^{-16} Watt/cm^2 olarak tanımlanır. Referans değeri olarak (I_0), 10^{-12} Watt/m^2 alınmaktadır.

Ses yutum katsayısı

Ses yutumu; ses enerjisinin sesin çarptığı yüzeyler üzerinde ya da sesin yayıldığı ortamda ısı enerjisine dönüşerek azalmasıdır. Bir yüzeyde yutulan ses enerjisinin o yüzeye gelen toplam ses enerjisine oranına yüzeyin ses yutum katsayısı adı verilir. Aşağıda Eş.2.26'da verilen ifade ile tanımlanır.

$$\alpha = 1 - \frac{I_a}{I_i} \tag{2.26}$$

Ses yutma katsayısı genel olarak, malzeme yüzeyine gelen ses dalgası açısının bir fonksiyonudur. α ile gösterilen ses yutma katsayısı, 0 ile 1 arasında değerler alabilir. α= 0 tümüyle yansıtıcı yüzeyleri; α = 1 ise, ses enerjisinin tümünü yutan yüzeyleri gösterir. Bir yüzeyin ses yutma katsayısı, malzemenin özelliklerine, kalınlığına ve frekansa bağlı olarak değişir. Bir yüzeyin alanıyla o yüzeyin ses yutma katsayısının çarpılmasıyla elde edilen değere yüzeyin ses yutumu adı verilir ve birimi Sabin'dir [58].

Ses iletim kaybı

Ses iletim kaybı, bir malzemenin, ses yalıtma kapasitesini dB cinsinden veren bir özelliğidir. Ses iletim kaybı, Eş.2.27 ifadesiyle tanımlanır.

$$TL = 10\ log \frac{w_1}{w_2} \tag{2.27}$$

Burada; W_1 malzemenin üzerine gelen veya giren toplam ses enerjisi, W_2 ise iletilen ses enerjisidir.

Ses iletimkatsayısı, Eş.2.28 ifadesiyle tanımlanır.

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \tag{2.28}$$

Veya ses iletim kaybı (dB), iletim katsayısı cinsinden aşağıdaki Eş.2.29 ile ifade edilir.

$$TL = 10\ log(\frac{1}{\tau})\ \text{(dB)} \tag{2.29}$$

Ses yalıtımı açısından, bir malzemenin ses iletim katsayısının küçük olması dolayısıyla ses iletim kaybının büyük olması istenir. Bir malzemenin ses iletim kaybı, frekans, malzeme özellikleri ve özellikle yüzey yoğunluğuna bağlı olarak değişir [59].

2.3.3. Gözenekli ortamda düzlem ses dalgaları

Akustik malzemelerin yutum katsayısı empedansa ve makroskopik özelliklere göre hesaplanır. Akustik düzlem dalga gözenekli sert bir malzemenin hava dolu gözeneklerinde yayılır. Malzeme içerisindeki ses yutumu dalga denklemi ile analiz edilir. Katı gözenekli malzemelerde hava titreşimleri ile yayılan düzlemsel ses dalgası yayılımı modifiye edilerek Eş.2.30'da verilen şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \left(\frac{\alpha_\infty \rho_0}{K_{ef}}\right) * \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \left(\frac{\sigma \phi}{K_{ef}}\right) * \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \tag{2.30}$$

P = Malzemenin silindirik gözenekleri içindeki ses basıncı (Pa)

ρ_o = standart sıcaklık ve basınçtaki hava yoğunluğu (g/cm^3)

K_{ef} = havanın etkin dinamik hacim modülü (N/m^2)

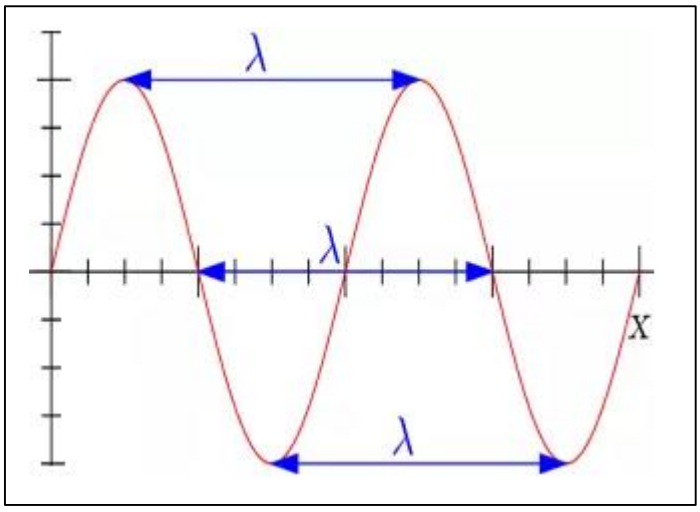
α_∞= kıvrımlılık

ϕ = gözeneklilik

σ = hava akış öz direnci (Ns/m^4)

Homojen gözenekli materyalin akustik davranışı karmaşık dalga sayısı (k_c) ve karakteristik empedansı (Zk) gibi temel nicelikler ile belirlenebilir. Bu nicelikler modifiye düzlem dalga denkleminin harmonik çözümüdür ve gözenekli malzemelerin akustik performansını, yani yutum katsayısı, yüzey empedansı ve iletim kaybını belirlemek için kullanılabilir. Dalga sayısı k frekansın mekansal benzerliği olarak görülür. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, dalga sayısı ses dalgası boyu (λ) olarak tanımlanan birim mesafe başına kaç defa tekrarladığının bir ölçüsüdür. Dalga Sayısı (k): Bir dalganın uzamsal frekansı olarak tanımlanabilir ve harmonik bir dalganın bir periyodundaki dalga sayısını ifade eder. Dalga sayısının birimi (SI) birim sisteminde (1/m)'dir. Gözenekli malzemedeki karmaşık dalga sayısı k_c, karmaşık bir terimdir ve $k_c = \gamma - j\beta$ formunu alır (Eş.2.31).

Karmaşık dalga sayısının gerçek kısmı yayılım sabiti olarak adlandırılır ve γ olarak gösterilir ve karmaşık dalga sayısının sanal (imajiner) kısmı, zayıflatma sabiti β olarak adlandırılır, zira ses dalgalarının zayıflatılmasından sorumludur. Ses dalgalarının genliği gözenekli bir malzemenin içindeki uzunluğa göre azalır. Karmaşık dalga sayısı, malzemenin bir özelliğidir [37].



Şekil 2.10. Ses dalga sayısının resimsel gösterimi [60]

Karakteristik empedans Zc, bir düzlem ses dalgasının yüzeye dikey olarak düştüğü sonsuz derinlikli bir malzemenin yüzeyinde, ses basıncının genlik ile ilgili partikül hızına oranı olarak tanımlanır. Gözenekli malzemenin karakteristik empedansı basınç ve hızın fazda olmadığını gösteren karmaşık bir terimdir [37].

2.3.4. Gözenekli ortamın akustik modelleri

Gözenekli bir akustik malzeme içersinde sesin yayılımını modellemek oldukça zordur. Gözenekli malzemelerin yapısı akışkan faz (genellikle hava ile dolu) ve katı faz (iskelet) olmak üzere iki farklı fazın birleşiminden oluşmaktadır. Malzemeler ses dalgalarını akışkan ve katı faz üzerinden aktarırlar.

Ses dalgalarına maruz kalan gözenekli bir malzeme, gözenekleri içindeki hava moleküllerinin titreşmesini sağlar ve ses enerjisini temal ve vizkoz ısıya dönüştürür. Düşük frekanslarda, bu enerji kayıpları izotermal ve ne yazık ki kısıtlıdır, yüksek frekanslarda bunlar adyabatiktir ve genellikle daha önemlidir [61].

Gözenekli malzemelerin sayısal modelleri iskelet yapılarının davranışlarına göre elastik (örneğin polimerik köpük), lifli (örneğin yumuşak lifli tabakalar), akustik olarak rijit (örneğin metalik köpük) ve esnek (örneğin sünger) modeller olarak sınıflandırılır. Elastik iskeletli yapılar Biot-poroelastik modeller ile, rijit ve esnek iskeletli yapılar ise eşdeğer akışkan modelleri ile tanımlanırlar [62].

Biot teorisi gözenekli ve gözenekli olmayan heterojen malzemeler homojen yapılı olarak tanımlanarak modellenmesine imkan sağlamaktadır. Endüstride birçok alanada ses yalıtım malzemelerinin performansı optimize edilirken malzeme modelleri kullanılmaktadır. Akustik yalıtım malzemelerindeki enerji kayıplarını temsil edebilecek kapsamlı tam Biot modeli ile sonlu elemenlar analizi yapılmış ve üç çeşit mekanizmanın gözenekli malzeme içerisindeki ses enerjisi kayıplarında etkili olduğu görülmüştür.

Bu mekanizmalar; iskelet yapısındaki sönümlemeler, katı ve akışkan faz arasındaki ısı iletiminden kaynaklı termal kayıplar ve sesin dalga boyuna kıyasla küçük boyutlardaki gözeneklerin sebep olduğu viskoz kayıplar (iskelet yapısındaki viskoz sönüm, akışkanın viskoz sürtünmesi, katı ve akışkan fazın etkileşimindeki şekil değiştirme ve kinetik enerji kayıpları) olarak ifade edilir [63].

Bu nedele gözenekli malzemelerin akustik performansı akışkanın makroskopik (Biot-akustik) özelliklerini dikkate alan modeller ile tahmin edilebilir. Literatürde, farklı yapılı malzemeler için sesin yayılımının modellenmesi üzerine birçok farklı yöntem ve teori

geliştirilmiştir. Bu modeller, hem yutum mekanizması hem de gözenek tipine göre farklılaşmaktadır. Çok sayıda numune üzerinde yapılmış olan regresyon analizi kullanılarak katsayıların belirlenmesi bu yöntemlerin ortak noktasıdır. Genel olarak literatürde, her malzeme tipi (Elastik, lifli, rijit, esnek) için farklı modeller belirlenmiştir. Bu çalışmada elastik, lifli, katı (rijit), esnek yapılı malzemeler için kullanılan modeller genel olarak değerlendirilmiş ve katı bir iskelet (çerçeve) sahip malzemeler için kulanılan Johnson, Champoux ve Allard (JCA modeli) tarafından türetilen analitik model üzerinde durulmuştur. Bu modelerde kullanılan matematiksel tanımlamalar malzemenin makroskopik (Biot-akustik) özellikleri ve gözeneklerdeki akışkanın (hava) özellikleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Yarı fenomolojik modeller kullanılarak akışkan fazın efektif veya dinamik hacim modülü (K_f) ve katı fazın efektif veya dinamik yoğunluğu (ρ_f) belirlenir. Bu iki parametre hesaplandıktan sonra teorik modeller kullanılarak malzemeye ait karakteristik empedans (Zk) ve karmaşık dalga sayısı (k_c) ifadesi elde edilir. Daha sonra transfer matris yöntemi kullanılarak yüzey empedansı ifadesine geçilir. Son olarak yüzey empedansı sayesinde malzemenin ses yutma katsayısı hesaplanır.

Bu sayısal nicelikler sesin malzeme içerisinde yayılımının makroskopik bir ifadesinin elde edilmesinde yardımcı olmakta, her gözenek için ses yayılımının nasıl olduğunu incelemektense daha çok yüzey empedans ve dalga sayısı hesaplanarak malzemenin ses yutuculuğu hakkında bilgi edinilmektedir.

Lifli malzeme modeli

Lifli malzemlerde, ses enerjisinin çoğu liflerden saçılarak ve bunun sonucunda oluşan titreşim tarafından yutulur. Lifli malzemelerin modellenmesi konusunda birçok araştırmacı çalışmış olup, farklı malzeme türleri için elde edilmiş yarı deneysel denklemler mevcuttur. Bu bölümde lifli malzeme tipi için en yaygın kullanılan Delaney ve Bazley Modeli paylaşılmaıştır.

Delaney ve Bazley modeli

Delany ve Bazley, gözeneklilik 1'e yakın olan lifli malzemelerde ses yayılımını tanımlamak için yarı ampirik bir model geliştirmiştir. Delany ve Bazley, Lifli yutum malzemeleri için, eğri uydurma yöntemi ile karakteristik empedans ve karmaşık dalga

sayısının (k_c) akış direnciyle nasıl değiştiğini bulmaya çalışmış ve bu konuda birçok gözenekli yutum malzemesi üzerinde ölçüm yapmıştır. Parametreler arası bulunan bu ilişkiler, geniş bir frekans aralığında iyi tahminler verdikleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut bir malzemeye uygulandığında bu model, uygulama açısından en basit ve en etkili olan yöntemlerden biridir.

Regresyon (gerilme) analizini kullanarak, karmaşık dalga sayısının (k_c) ve karakteristik empedansı Zc'yi tahmin etmek için Delany ve Bazley tarafından türetilen ampirik denklemler Eş.2.32 ve Eş.2.33 olarak aşağıda verilmiştir [64].

Karmaşık dalga sayısının (k_c), aşağıaki eşitlikle tanımlanır.

$$k_c = j\frac{\omega}{c}\left[1 + 0.0978\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-0.700} - j0.189\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-0.595}\right] \quad (2.32)$$

Karakteristik empedansı Zc, (Ns/m^3);

$$Z_c = j\frac{\omega}{c}\left[1 + 0.0571\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-0.754} - j0.087\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-0.732}\right] \quad (2.33)$$

Burada; ρ_o = standart sıcaklık ve basınçtaki havanın yoğunlu (g/cm^3), f = lifli malzemenin frekansı (Hz), σ ise birim kalınlıktaki akış direnci (Ns/m^4), $\omega = 2\pi f$: açısal frekens (Hz), c: standart sıcaklık ve basınçtaki havanın hızı (m/s)'dir. Ayrıca j, imajiner (sanal) birimdir ve -1'in kareköküne eşittir.

Bu formülasyonların uygulanabilmesi için, öncelikle malzemenin gözenekliliği 1'e yakın olması, bu da Delany-Bazley modelini doğru bir şekilde uygulamak için malzemede yüksek bir gözenek oranının mevcut olması gerektiği anlamına gelir. İkinci olarak 0,01 $<\frac{\rho_0 f}{\sigma}<$ 1,0 belirli bir frekans aralığında çalışılacağı anlamına gelir ve son olarak akış direncinin limitleri 1,000 $<\sigma <$50,000 Nsm^{-4} arasında olmalıdır [65]. Delany ve Bazley tahminleri düşük frekanslarda hatalı sonuçlar vermektedir fakat bu frekanslar yutumun oldukça küçük olduğu aralıklardır [57].

Esnek iskelet yapısına sahip model

Bir malzemede, iskelet olarak ifade edilen yapının sertliği söz konusu değil fakat atalet etkileri akustik enerji üzerinde belirgin etkiye sahipse esnek yapılı bir malzeme olarak ifade edilir. Esnek yapılı malzemelerde, katı faz hareket eder ve iskeletin hacimsel modülü ise havanınkinden belirgin şekilde düşüktür. Esnek yapılı malzeme içersinde ses sadece akustik sıkıştırma dalgası şeklinde sabit sıcaklık koşullarında yayılır. Esnek yapılı modelde katı fazın kütlesinin ataleti hesaba katılır. Esnek iskeletli yapılar eşdeğer akışkan modelleri ile tanımlandığından eşdeğer Δ laplace operatörü, eşdeğer akışkanın yoğunluğu ($\tilde{\rho}_{eq}$) ve hacim (bulk) modülü ($\tilde{K}_{eq}$) olmak üzere eşdeğer akışkan modeli Eş.2.34 ile aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\Delta p + \omega^2 \frac{\tilde{\rho}'_{eq}}{\tilde{K}_{eq}} p = 0 \tag{2.34}$$

Hacim (bulk) modülü değişmeden kalırken eşdeğer akışkanın efektif yoğunluğu ($\tilde{\rho}'_{eq}$) Eş.2.35'de verielen şekilde değişir.

$$\tilde{\rho}'_{eq} \approx \frac{\tilde{\rho}_{eq} M - \rho_0^2}{M + \tilde{\rho}_{eq} - 2\rho_0^2} \tag{2.35}$$

M malzemenin toplam hacimsel kütle yoğunluğu olarak Eş.2.36 ile aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$M = \phi \rho_0 + \rho_S \tag{2.36}$$

Burada; ρ_s = malzeme iskeletinin yoğunluğudur, ρ_0 akışkan yoğunluğudur.

Esnek iskeletli model, cam yünü gibi düşük elastisite modülüne sahip olan malzemeler için daha uygundur ve efektif yoğunluk ile hacim modülü ile ifade edilebilir [62].

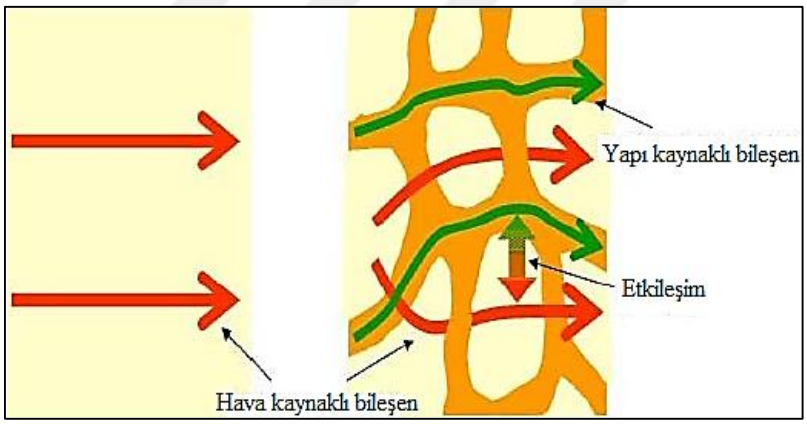
Elastik gözenekli model

Elastik gözenekli (poroelastik) modelde, ses dalgası yayılımı gözeneklerdeki ve katı iskelet boyunca hava yoluyla gerçekleşir. Bu nedenle, her iki faz da dinamik hareket halindedir.

Ses dalgasının yayılımı, sert iskelet yapı veya esnek iskelet yapılı gözenekli malzemeden daha karmaşıktır. Literatürde, elastik iskeletli yapıları en iyi şekilde ifade eden model Biot teorisidir. Biot, ses yayılımı olgusunu tam olarak tanımlamak için yapısal ve akışkan bölümleri için gerilme ve gerinim ilişki denklemlerini geliştirmiştir [66,67].

Biot teorisi, bir elastik katı fazdan (iskelet) ve bir akışkan fazdan oluşan bir gözenekli ortamda üç ses dalgasının aynı anda yayıldığını belirtmektedir. Bu ses dalgaları elastik sıkıştırma dalgası, akustik sıkıştırma dalgası ve elastik kesme (enine) dalgasıdır.

Havaya doymuş gözenekli malzemelerde, iskelet ve hava arasındaki etkileşim hali ihmal edilebilir ve bu dalgalar iskelet kaynaklı ve hava kaynaklı dalgalar şeklinde tanımlanabilirler. Zayıf bir etkileşim söz konusu olduğunda hava kaynaklı dalga çoğunlukla gözeneklerin içerisinde kalır, ancak iskelet-kaynaklı dalga hem iskeletin, hem de gözeneklerin içinde yayılacaktır (Şekil 2.11). Üçüncü dalga tipi olan kesme dalgası da iskelet kaynaklıdır ve çoğu gözenekli yutum elemanı akışkan havadan etkilenmez. Bu dalga normal koşullarda meydana gelmez; dolayısıyla ihmal edilebilir.



Şekil 2.11. Havadaki (solda) ve gözenekli bir malzemedeki (sağdaki) ses yayılımı [68]

Yer değiştirme ve gözeneklerdeki ve iskeletdeki havanın gerilme tensörleri için hareket denklemleri tanımlanmıştır. Bu hareket denklemleri, hava ve iskelet arasındaki ilişkiyi detaylandıran bir katsayı seti içermektedir. Bu hareket, akustik dalganın viskoz ve ısıl enerji kayıplarını hesaba katan, akışkan fazın etkin (efektif) hacim modülü (K_f) ve etkin yoğunluğu (ρ_f) ile karakterize edildiği eşdeğer akışkan Helmholtz denklemiyle yönetilir. Bu katsayılar tanımlandığında, hareket denklemleri, gözenekli katmanların yüzey empedansını bulmak için çözülebilir hale gelmektedir.

Akışkan ortamın basıncı (P) ve katı fazın yer değiştirme vektörü ($\underline{u}$) ile tanımlanan, sıkıştırma ve kesme dalgalarının dinamik davranışı aşağıdaki şekilde Eş.2.37 ile ifade edilir.

$$div\,\hat{\boldsymbol{\sigma}} + \omega^2\,\tilde{\rho}_s\underline{u} = -\tilde{\gamma}\,grad\,p \tag{2.37}$$

Bu denklemde; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ gerilme tensörü, $\tilde{\rho}_s$ katı fazın yoğunluğu, $\tilde{\gamma}$ akışkan ve katı fazı birleştirme katsayısıdır.

Akustik dalgaların yayılımı Eş.2.38'de verielen Helmholtz denklemi ile ifade edilir:

$$\frac{\phi}{\omega^2\,\tilde{\rho}_f}\Delta p + \frac{\phi}{\tilde{K}_f}p = \tilde{\gamma} div\,\underline{u} \tag{2.38}$$

$\tilde{\gamma}$ akışkan ve katı fazı birleştirme katsayısı ise aşağıdaki Eş.2.39 ile ifade edilir.

$$\tilde{\gamma} = \frac{\phi\rho_0}{\tilde{\rho}_f} + \frac{K_b}{K_s} - 1 \tag{2.39}$$

$\tilde{\rho}_s$ katı fazın yoğunluğu Eş.2.40'da verilen şekilde tanımlanır.

$$\tilde{\rho}_s = \tilde{\rho}_1 + \phi\rho_0\left(1 - \frac{\rho_0}{\tilde{\rho}_f}\right) \tag{2.40}$$

Bu denklemlerde; ($\tilde{K}_f$) akışkan fazın etkin hacim modülü, ρ_0 gözeneklerdeki akışkan yoğunluğu, ($\tilde{\rho}_f$) akışkan fazın etkin yoğunluğu, $\rho_1$vakum altındaki malzemenin (havası alınmış) kütle yoğunluğu, ($K_{s.}$) elastik malzemenin hacim (bulk) modülü, (K_b) vakum altında iskeletin hacim (bulk) modülü, ϕ gözeneklilik, Δ laplace operatörü, tilde sembolü (~) karmaşık ve frekansa bağlı bir değişkeni temsil eder [66,67].

Elastik bir iskelete sahip olan ve sert bir zemine oturtulmuş birçok malzeme için, iskeletin geniş akustik frekans aralıkları için neredeyse hareketsiz olabileceği, böylece sert iskeletli malzeme modellerinin kullanılabileceği belirtilmiştir.

Katı gözenekli eşdeğer akışkan modeli

Rijit yapılı malzemelerde gözenekli ortamın hareketsiz olduğu kabul edilir. Yapı herhangi bir deformasyona uğramaz. Bu durum, yapı rijit olarak sınırlandırıldığında veya elastik yapılı bir malzeme için katı faz ve akışkan faz arasındaki etkileşimin ihmal edildiği durumlarda meydana gelir [69].

Gözenekli malzeme içerisinde sadece akustik sıkıştırma dalgalarının yayıldığı kabul edilir. Eş.2.41'da verilen Helmholtz denklemi gözenekli yapının hareketli olduğu ($\underline{u} = 0$) varsayımı ile sadece akışkan ortam için aşağıdaki şekilde verilir.

$$\frac{1}{\omega^2 \tilde{\rho}_{eg}} \Delta p + \frac{1}{\tilde{K}_{eg}} p = 0 \qquad \text{(Eş.2.41)}$$

Rijit yapılı malzemenin eşdeğer akışkan modeli, ($\tilde{\rho}_{eg} = \frac{\tilde{\rho}_f}{\phi}$) etkin (dinamik) yoğunluğuk, $\tilde{K}_{eg} = \frac{\tilde{K}_f}{\phi}$ hacim (bulk) modülü ile temsil edilir. Bu nicelikler, eşdeğer akışkan ortamının daha yaygın karakteristik empedansı ve karmaşık dalga sayısı çıkarmak için kullanılabilir. Eşdeğer akışkan ortamın dalga sayısı (k_{eg}), Helmholtz diferansiyel denklemin tek boyutlu hal için çözümünden Eş.2.42 ve Eş.2.43'de verilen aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$k_{eg} = \omega \sqrt{\frac{\rho_{eg}}{K_{eg}}} \qquad (2.42)$$

$$Z_{eg} = \sqrt{\rho_{eg} K_{eg}} \qquad (2.43)$$

Akışkan dolu sert gözenekli malzemelerde uzun dalga boyu akustik yayılma ve dağılma olayı viskoz ve ısıl enerji kayıplarını hesaba katan, eşdeğer akışkan fazın etkin (efektif) hacim modülü (K_{eg}) ve etkin yoğunluğu (ρ_{eg}) ile eşdeğer akışkan olarak modellenebilir. Bu nicelikler, makroskobik parametrelerin kullanılıdığı farklı yarı fenomenolojik modeller ile türetilebilir. Rijit yapılı malzemeler için Johnson-Champoux-Allard (JCA) modeli kullanılmıştır.

JCA tarafından tanımlanan modelde visko-atalet etkiler frekansa bağlı etkin yoğunluk (ρ_{eg}) ve ısıl etkiler ise sıkıştırılabilirlik olarak bilinen eşdeğer akışkan hacim modülü (K_{eg})

ile tarif edilir. JCA modelinde katı ve akışkan faz arasındaki etkileşimi tanımlamak için beş makroskopik parametre kullanır: gözeneklilik ϕ, spesifik hava akış özdirenci σ, kıvrımlılık α_∞, viskoz karakteristik uzunluğu Λ ve ısıl karakteristik uzunluğu Λ' dur [70,71].

JCA modeli aşağıda Eş.2.44 ve Eş.2.45'de verilen şekilde tanımlanır.

$$\rho_{eg}(\omega) = \frac{\rho_0\,\alpha_\infty}{\phi}\left[1 - i\frac{\sigma\phi}{\omega\rho_0\,\alpha_\infty}\sqrt{1 + i\omega\rho_0\,\eta\left(\frac{2\,\alpha_\infty}{\sigma\phi\Lambda}\right)^2}\right] \tag{2.44}$$

$$\frac{1}{K_{eg}} = \frac{\phi}{\gamma P_0}\left\{\gamma - (\gamma - 1)\left[1 - i\frac{8\eta}{\omega\rho_0 P_r \Lambda'^{\,2}}\sqrt{1 + i\frac{i\omega\rho_0 P_r}{\eta}\left(\frac{\Lambda'}{4}\right)^2}\right]^{-1}\right\} \tag{2.45}$$

Burada ω açısal frekans, ρ_0 akışkanın yoğunluğu, η = havanın vizkozitesi, γ = havanın özgül ısı oranı, P_0 atmosferik basınç ve Pr Prandtl sayısıdır.

Daha karmaşık geometriler için (örneğin: açık gözenekli köpükler), deneysel yöntemler veya yerel geometri parametrelerinin bir duyarlılık analizi yapmak için, sonlu elemanlar analizi, asimptotik düşük (sabit Stokes) ve yerel ölçekte yüksek (elektrik) frekanslı viskoz sınır değer problemlerini çözmek için sayısal yöntemler kullanılabilir.

Yukarıdaki eşitlikler yardımıyla efektif yoğunluk ve hacim modülü tanımlandıktan sonra karakteristik empedans ve yayılım dalga sayısının hesaplanması mümkündür. Dik gelen akustik düzlem dalgası k_{eg} (ses dalgası) altında, sert bir yüzey ile desteklenen Ls kalınlığındaki bir gözenekli malzeme katmanı düşünüldüğünde. Ses yutum katsayısı yüzey empedansı Z_n yöntemiyle aşağıdaki Eş.2.46-49'da verieln şekilde türetilebilir [65].

$$\alpha = 1 - \left|\frac{Z_n - 1}{Z_n + 1}\right|^2 \tag{2.46}$$

$$Z_n = -i\frac{Z_{eg}}{\rho_0 c_0}\cot\left(k_{eg}L_s\right), \tag{2.47}$$

$$Z_{eg} = \sqrt{\rho_{eg}K_{eg}}\,, \tag{2.48}$$

$$k_{eg} = \omega\sqrt{\rho_{eg}/K_{eg}} \tag{2.49}$$

Bu eşitliklerde;

c_0: Havadaki ses hızı (m/s)

Z_n: Gözenekli ortamın normalize edilmiş yüzey empedansı

Z_{eg}: Karakteristik empedans (Ns/m^3)

k_{eq}: Karmaşık/ kompleks dalga sayısı

ρ_{eg}: Akışkan fazın efektif yoğunluğudur.

Çoğu frekans için rijit iskeletli model doğrudur, fakat 500 Hz civarında sapmalar meydana gelmektedir. Bu hatalar rijit iskeletli model ile öngörülemeyen iskelet malzemesinin rezonanslarından kaynaklanmaktadır [57].

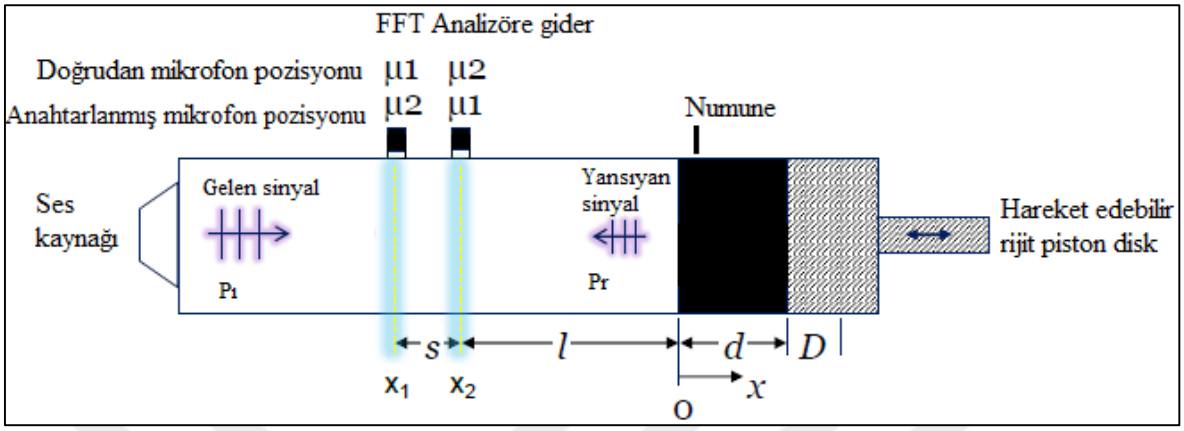
2.3.5. Ses yutum katsayısı ölçümü için transfer fonksiyonu yöntemi teorisi

Bir empedans tüpünde ses yutum katsayısını ve iletim kaybını ölçmek için kullanılan iki yöntem vardır. Birinci yöntem, frekansa göre durağan dalga oranının ölçümüne dayanmaktadır. İkinci yöntem, iki mikrofon konumunda basınç ölçümlerine ve geniş bantlı bir sinyal ile uyarmaya dayanır ve iki mikrofon sinyali arasındaki transfer fonksiyonunun ölçümünü içerir.

Transfer fonksiyonu tekniğinin altında yatan teori göstermektedir ki bu, geniş bant sabit rasgele bir sinyalin (ses kaynağı tarafından üretilen), empedans tüpü duvarındaki iki noktada akustik basınçlar arasında basit bir transfer fonksiyonu ilişkisini kullanarak gelen ve yansıtılan bileşenlerine ayrışmasını içerir (Şekil 2.12).

Transfer fonksiyonunu bulmak için çift kanallı Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) analizörü, tüpün üst yüzeyi boyunca yerleştirilmiş birbirine yakın iki adet mikrofon ve beyaz gürültü üreten bir kaynak kullanılarak ölçüm yapılır. Bu durumda, mikrofon tepkilerinde bir fark varsa bunu kompanse edilir. Önce bir ölçüm yapılıp daha sonra mikrofonlar yer değiştirilerek ikinci ölçüm yapılır. İki mikrofon için bir empedans tüp konfigürasyonunun

çizimi, gelen ve yansıyan dalgayı, mikrofonların, ses kaynağının ve numunenin pozisyonlarını göstermektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. İki mikrofon transfer fonksiyonu yöntemi [62]

Mikrofonlar daha önce faz için kalibre edilmiş ve transfer fonksiyonu yönteminin geçerliliği için uygun bir mikrofon anahtarlama tekniği ile eşleştirme elde edilmiştir.

Bu yöntemde, ölçüm hem gelen hem de yansıyan dalgaların aynı düzlemde ve aynı yönde olmasını sağlamak için, yüzeye dik geliş koşullarında ($\theta = 0$) yayılan ses dalgası ve uygun çap ve uzunlukta bir empedans tüpü içinde mümkündür. Kullanılabilir frekans aralığı, tüpün çapına ve mikrofon pozisyonları arasındaki mesafeye bağlıdır.

Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, bu iki mikrofon yönteminin şeması, ses kaynağının (hoparlörün) empedans tüpünün bir ucuna monte edildiğini ve malzemenin empedans tüpünün diğer ucunda ayarlanabilir bükülmez bir piston üzerine yerleştirildiğini göstermektedir. Hoparlör, tüpte düzlem dalgaları olarak yayılan geniş bant, sabit ve rastgele ses dalgaları üretir. Gelen düzlem dalgası test örneğine çarptığında, gelen ses enerjisinin bir kısmı, numune tarafından yutulmakta ve geri kalan kısım, yüzeyden yansıtılmaktadır. Ses yutumundan kaynaklanan ses enerjisindeki kayıp nedeniyle, gelen ve yansıyan düzlem dalgaları faz dışıdır. Sonuç olarak, tüp içinde ileri ve geri hareket eden dalgaların üst üste gelmesine bağlı olarak bir duran dalga girişim modeli üretilir.

Bir çift mikrofon, iki sabit lokasyonda ses basıncını ölçmek için tüpün iç tarafı ile tüpün numune ucunun yakınına monte edilir. Mikrofonlar arasındaki aktarım işlevini (frekans tepki fonksiyonu) elde etmek için iki kanallı dijital frekans spektrumu analizörü kullanılır.

Empedans tüpünde, düzlemsel dalgaların ilerlediği varsayılmaktadır. Tüp içersindeki kararlı basınç (P) değişmleri gelen ve yansıtılan dalga olarak aşağıdaki Eş.2.50 ve Eş.2.51'de verilen ifadeler ile temsil edilmektedir:

$$P_1 = A\left[e^{jkx_1} + Re^{jkx_1}\right] \tag{2.50}$$

$$P_2 = A\left[e^{jkx_2} + Re^{-jkx_2}\right] \tag{2.51}$$

Bu denklem 2 bilinmeyene sahiptir. Biri genlik A, diğeri ise yansıma çarpanı R'dir. Burada, k dalga sayısı olup, malzeme z =0 pozisyonunda ve j imajiner (sanal) birimdir. İlk terim, gelen dalga, ikinci terim ise yansıyan dalgayı temsil etmektedir.

Transfer fonksiyonun sadece basınçların bir oranıdır. Tüpün her iki ucundaki basınç ölçülerek iki mikrofon arasındaki transfer fonksiyonu ve paralel denklem çözümleri ile yansıma çarpanı elde edilir.

H_{12} transfer fonksiyonundan, basıncın yansıma katsayısı R, yutum katsayısı α ve malzemenin yüzey empedansı z olarak Eş.2.52 ile aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\mathrm{Re}^{-jkx_2} + e^{jkx_2}}{\mathrm{Re}^{-jkx_1} + e^{jkx_1}} \tag{2.52}$$

Burada z_1 ve z_2 mikrofon pozisyonlarıdır. Denklem tekrar düzenlenerek yansıma çarpanı aşağıdaki Eş.2.53 ile elde edilir.

$$R = \frac{e^{jks} - H_{12}}{H_{12} - e^{-jks}} e^{j2kx_2} \tag{2.53}$$

Yansıma çarpanından yutma katsayısı ve yüzey empedansı Eş.2.54 ve Eş.2.55 ile hesaplanır.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \tag{2.54}$$

$$z = \rho_0 c \frac{1+R}{1-R} \tag{2.55}$$

Burada;

x_1= Numune yüzeyinden 1. mikrofona olan mesafe

x_2= Numune yüzeyinden 2. mikrofona olan mesafe

H_{12}= Mikrofonlar arasındaki transfer fonksiyonu

P_1= Mikrofon 1 tarafından ölçülen basınç (referans kanal)

P_2= Mikrofon 2 tarafından ölçülen basınç

k= Dalga sayısı

$\rho_o c$= havanın karakteristik empedansıdır.

Taransfer fonksiyonu yönteminin avantajı yutum ve yüzey empedansını bütün frekanslarda elde edilebilmesidir. Duran dalga metodundan daha verimli ve etkin olmasının sebebi de budur. Transfer fonksiyonu iki mikrofon arasında ölçülmektedir. Mikrofonlar arası mesafe için bazı limitler belirlenmiştir. Eğer mikrofonlar birbirlerine çok yakınsa transfer fonksiyonu yanlış olacaktır çünkü basınçtaki değişim çok küçük olacak bu da doğru bir ölçümün yapılmasına engel teşkil edecektir. Bu nedenle düşük frekans limitlenmesi aşağıda Eş.2.56'da verilen şeklilde tanımlanır.

$$f_l > 0.05 \frac{c_0}{s} \tag{2.56}$$

Burada c_0 havadaki ses hızı, $s = |x_1 - x_2|$ mikrofon pozisyonları arasındaki mesafedir (Bkz. Şekil 5.3).

Bunun tersi durumda, mikrofonlar birbirlerinden çok uzaksa yine aynı problem ortaya çıkacaktır. Aradaki mesafe dalga boyuna denk gelirse bu sefer de iki mikrofon tarafından ölçülen basınç değerleri aynı olacağından bir basınç farkı elde edilemeyecek ve çözümü olmayan denklemler elde edilecektir. Yine bu sebeple de bir üst frekans limiti aşağıda Eş.2.57'da verilen ifade ile belirlenmektedir.

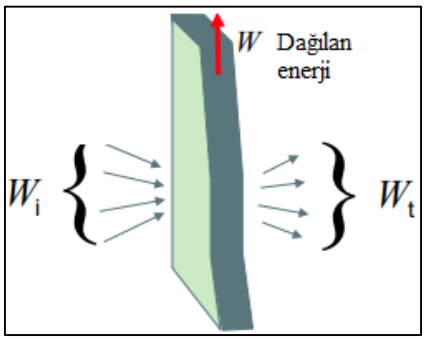
$$f_u < 0.45 \frac{c_0}{s} \tag{2.57}$$

Her aralık için frekans sınırlarının düzgünce seçilmesi sonucunda elde geniş bir frekans aralığı olacaktır [72].

2.3.6. Ses iletim kaybı ölçümü için transfer matrisi yöntemi teorisi

Ses kaynağı sayesinde oluşan düzlemsel ses dalgaları malzemeye çarpar ve bir kısmı yansıyarak geri dönerken, bir kısmı malzeme tarafından yutulur ve bir kısım ise malzeme içersinden geçerek tüpün diğer ucuna doğru yönelir. Malzeme içersinden geçen ses dalgalarının bir kısmı ise tüpün diğer ucundan geri yansır, bir kısmı ise dışarıya doğru yönelir. Dört mikrofon pozisyonunda ses basınçları ölçüldükten sonra dört kanallı dijital frekans analizörü sayesinde karmaşık transfer matris fonksiyonu hesaplanarak malzemenin ses iletim kayıplarının elde edilmesi mümkündür.

Kullanılan frekans aralığı tüpün çapına ve mikrofonlar arası mesafeye bağlıdır. A, B, C ve D karmaşık genlik ifadeleri olmak üzere, transfer matris yöntemi kulanılarak malzemenin her iki yüzeyindeki ses basınç ve partikül hızlarının hesaplanmasına yardımcı olurlar. Transfer matris elemanları da partikül hızı ve yüzey basınç değerlerinden yola çıkılarak hesaplanır ve daha sonra da empedans tüpü içersindeki sınır şartları uygulanarak ses gücü iletim katsayısı ve ses iletim kaybı ifadelerine elde edilir [32]. Şekil 2.13'de görülen iki ortamı ayıran bir malzemenin ses iletimi kaybı Eş.2.58'de verilen şeklilde tanımlanır.



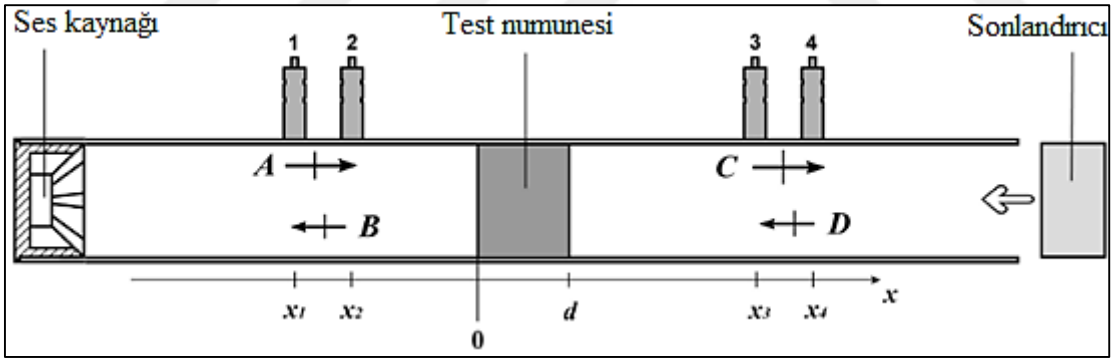
Şekil 2.13. İki ortamı ayıran bir malzemenin ses iletim kaybı [73]

$$TL\ (\omega) = 10log_{10}\left(\frac{W_i}{W_t}\right) \tag{2.58}$$

Burada W_i ve W_t, malzeme yüzeyine gelen hava kaynaklı ses gücü ve malzeme tarafından iletilen ve diğer taraftan yayılan ses gücüdür.

Malzemenin yüzeyine dik gelen ses dalgasi için iletimi kaybının ölçümü, ya dalga alanı ayrıştırma yöntemlerine ya da transfer matrisi yöntemine dayanmaktadır. Her iki teknikte dört mikrofonlu bir empedans tüpü ve bir FFT analizörü kullanılır. İki yüklü ve iki kaynaklı yöntemler, en yaygın kullanılan transfer matrisi yaklaşımlarıdır. Transfer matrisi, karmaşık ses basınçları ile x = 0'dan x = d'ye uzanan gözenekli bir katmanın iki yüzündeki karmaşık dik gelen akustik partikül hızları arasındaki ilişkiyi tanımlar.

Dört mikrofonlu transfer fonksiyonu yöntemi, bir çift mikrofon ve değiştirilebilir bir yankısız sonlandırma imkânına sahip olan modifiye bir duran dalga empedans tüpü kullanır. Empedans tüpü düzgün iç kesitli, sınırlı uzunlukta, sert duvarlı bir tüpten oluşan tek boyutlu bir akustik sistem olduğu varsayılmıştır. Empedans tüpü bir ucunda sisteme geniş bantlı, sabit rastgele uyarım sağlayan bir ses kaynağına sahiptir. Tüp diğer ucu ise açık uçlu bir sonlandırma kullanılarak istenilen sonlandırma koşulları ile ayarlanabilir. Tüpün iç hacmi, Şekil 2.14'de gösterildiği gibi, tüp kesiti boyunca yerleştirilen, malzemenin bir yüzeyi ile iki kısma ayrılır. Malzemenin tüp yüzeyine temas eden iki yüzü, tüp yüzeyine düz ve diktir.



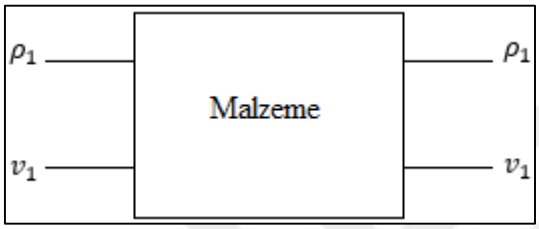
Şekil 2.14. Duran dalga tüpünün şematik diyagramı [74]

Hesaplamaların yapılabilmesi için ikinci ölçüm ortamında bulunan yansıyan ses dalgasının denklemden kaldırılması gerekmektedir. Bu sebeple ölçümler sonlandırıcı kullanılarak ve tüpün ucu açık şekilde iki kere yapılır. Anekoik sonlandırıcı önünde kalın bir sünger tabakası bulunan ve Şekil 2.14'de C olarak ifade edilen etkiyen (malzemenin içinden geçen) ses dalgasının tamamen sönümlenmesini (yansımasız- anekoik şart), Şekil 2.14'de D ile gösterilen yansıyan ses dalgasının 0 değerini almasını sağlayan bir aparattır. Yukarıdaki empedans tüpü içerisinde yankılanmanın çok iyi bir şekilde sonlandırması (D = 0) ile bir düzlem ses dalgası için ses iletim kaybı aşağıda verilen Eş.2.59 ile tanımlanır.

$$TL_n(\omega) = 10log_{10}\left(\left|\frac{A^{(yankısız)}}{C^{(yankısız)}}\right|^2\right) \quad (2.59$$

Burada, n altindisi, malzemenin dik gelen bir düzlem ses dalgası alanına maruz kaldığını gösterir.

İncelenen malzemenin dört kutuplu (iki giriş, iki çıkış) lineer, zamandan bağımsız ve doğrusal akustik alt sistem olarak tanımlanabileceği varsayılır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Transfer matrisi yöntemindeki giriş ve çıkış değişkenleri [75]

Şekil 2.15.'de görüldüğü gibi, malzemeye gelen ses basıncı (P) ve partikül hızı (v) değerleri çıkışta değişirler. Böylece akustik malzemenin ses iletimi giriş ve çıkışlarındaki P ve v'ye bağlı olarak dört kutup yöntemi ile tanımlanabilirler. Buna göre giriş basıncı ve hızı çıkış basınç ve hızının üst üste gelmesi ile hesaplanabilir.

Eş.2.60'da yer alan değişkenlerinden oluşan matris'e transfer matrisi adı verilmektedir. Transfer matrisi yönteminin en önemli özelliği, birden fazla malzeme için hesaplama kolaylığıdır. Akustik malzemeler arasında P ve v sürekliliği olduğu kabul edilir. Her bir akustik malzeme için deneysel, analitik ya da nümerik yöntemler ile elde edilen transfer matrisleri çarpılarak, sistemin giriş ve çıkışı arasındaki toplam bağlantı elde edilebilir. Daha sonra, numunenin dış iki yüzeyi üzerinde karmaşık basınçları P ve karmaşık dik gelen akustik partikül hızlarını (v) ilişkilendirmek için Eş.2.60'da verilen bir transfer matrisi oluşturulur:

$$\begin{bmatrix} P \\ v \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ v \end{bmatrix}_{x=d} \quad (2.60)$$

Ancak, akustik malzemelerin P ve v'a bağlı tanımlanabilmesi için giriş ve çıkışlarındaki akustik karakter, düzlem dalga şeklide olmalıdır. Sonuç olarak transfer matrisi yönteminin

akustik malzemenin basınç ve hız değerlerinin alındığı ara yüzeyde düzlem dalga mevcut olduğu durumda geçerlidir.

A pozitif x yönünde hareket eden gelen ses dalgasının genliğini, B negatif x yönünde hareket eden giden (yansıyan) ses dalgası genliğini ifade eder.

Her mikrofon konumunda ölçülen karmaşık basınç, pozitif X-gidiş ve negatif X-gidiş düzlem dalgasının toplamıdır. Pozitif X-gidiş düzlem dalgasının basınç genliği, A ise ve negatif X-gidiş düzlem dalgası B ise, iki mikrofona ait lokal basınçlar yukarı yönde oluşur. Benzer şekilde, eğer pozitif yönde giden düzlem dalgasının basınç genliği C ise ve negatif gidiş düzlem dalgasının genliği D ise, bu durumda mikrofon konumlarındaki karmaşık basınçlar aşağı akış yönünde oluşur.

Gözenekli tabakanın iki yüzeyindeki (Px = 0, d ve Vx = 0, d) yukarı ve aşağı akış basınçları ve partikül hızları, düzlem dalgasının ölçülen basınç genliğinden, hava'nın karakteristik empedansı $\rho_0 c$ ile belirlenir.

Eş.2.60 iki denklemi ve dört bilinmezliği; T_{11}, T_{12}, T_{21} ve T_{22} temsil eder. Transfer matrisinin elemanlarını çözebilmek için iki ek denklem gereklidir. Bu denklemler iki yük yöntemi ve iki kaynak yöntemi ile elde edilebilir. Her iki yöntemde, iletim kaybı hesaplaması için mükemmel bir yankılanma sonlandırması kullanılır. Bu her iki yöntemde oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, iki kaynak yöntemi, kaynak ya da akustik malzemenin yönünün değiştirilmesini gerektirmesi nedeniyle pratik değildir [75].

Empedans tüpünün her iki bölümündeki ses alanında, ileri (pozitif) ve geri (negatif) x yönünde hareket eden ses dalgalarının üst üste gelmesine bağlı olarak iyi bir şekilde yakınsanabilir.

Tüpün yukarı akış kesimini sonlandıran numunenin yüzeyindeki başlangıç noktası ile karmaşık bir üstel gösterim ve bir koordinat sistemi benimseyerek yukarı ve aşağı empedans tüpü kesitlerinde ses basıncı ve partikül hızı Eş.2.61 ve Eş.2.62 ile tanımlanır [73].

$$p(x,t) = Re\{P(x,\omega)e^{j\omega t}\} = \begin{cases} Re\{(A(\omega)e^{-jkx} + B(\omega)e^{jkx})e^{j\omega t}\}\, x \le 0 \\ Re\{(C(\omega)e^{-jkx} + D(\omega)e^{jkx})e^{j\omega t}\} x \ge l \end{cases} \quad (2.61)$$

$$v(x,t) = Re\{V(x,\omega)e^{j\omega t}\} = \begin{cases} Re\left\{\frac{A(\omega)e^{-jkx} - B(\omega)e^{jkx})}{\rho_0 c} e^{j\omega t}\right\} x \leq 0 \\ Re\left\{\frac{C(\omega)e^{-jkx} - D(\omega)e^{jkx})}{\rho_0 c} e^{j\omega t}\right\} x \geq l \end{cases} \quad (2.62)$$

Burada; Re {} gerçek kısmı, p karmaşık basınç, V karmaşık partikül hızı, A'dan D'ye, düzlem dalga bileşenlerinin karmaşık genlikleri, ρ_0 ortam akışkanı yoğunluğunu, c ortam ses hızını, ω açısal frekans, $k_c = (\omega/c) - j\beta$, kanalın iç yüzeyinde oluşan titreşimli termo-viskoz sınır tabakasında viskoz ve ısıl yayılımın etkilerini hesaba katmak için karmaşık olan dalga sayısı ve l, numunenin kalınlığıdır.

Eş.2.61 ve Eş.2.62'demalzemenin iki yüzeyindeki basınçlar ve partikül hızları, A, B, C, D katsayıları cinsinden aşağıda verilen Eş.2.63 ve Eş.2.64 ile ifade edilebilir.

$$P^{(s)}\big|_{x=0} = A^{(s)} + B^{(s)}, \qquad P^{(s)}\big|_{x=d} = C^{(s)}e^{-jkd} + D^{(s)}e^{jkd} \quad (2.63)$$

$$V^{(s)}\big|_{x=0} = \frac{A^{(s)} - B^{(s)}}{\rho_0 c}, \qquad V^{(s)}\big|_{x=d} = \frac{C^{(s)}e^{-jkd} - D^{(s)}e^{jkd}}{\rho_0 c} \quad (2.64)$$

Burada, s altindisleri, niceliklerin keyfi sonlandırma koşulu s için belirlendiğini gösterir.

Daha sonra, çok iyi bir yankılanma sonlandırması yani düzlem dalgası yansıma genliği D = 0 koşullu sağlandığında Eş.2.63 ve Eş.2.64, Eş.2.60'da yerine koyularak dik geliş ses iletim kaybı aşağıdaki Eş.2.65 ile hesaplanır.

$$TL_n(\omega) = 10log\left(\frac{1}{4}\left|T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} + T_{22}\right|^2\right) \quad (2.65)$$

Empedans tüpü içindeki bir malzeme tarafından iletilen ses gücü W_t'nin hem numunenin özelliklerine hem de sonlandırma koşullarına bağlıdır. Ayrıca Eş. 2.65'de verilen dik gelen ses dalgasının iletim kaybı, sadece ölçüm ortamının değil, numunenin özellikleri olan transfer matris elemanları cinsinden ifade edilir, böylece kesin olmayan bir ifade sağlanır [73].

2.4. Metalik Köpükler

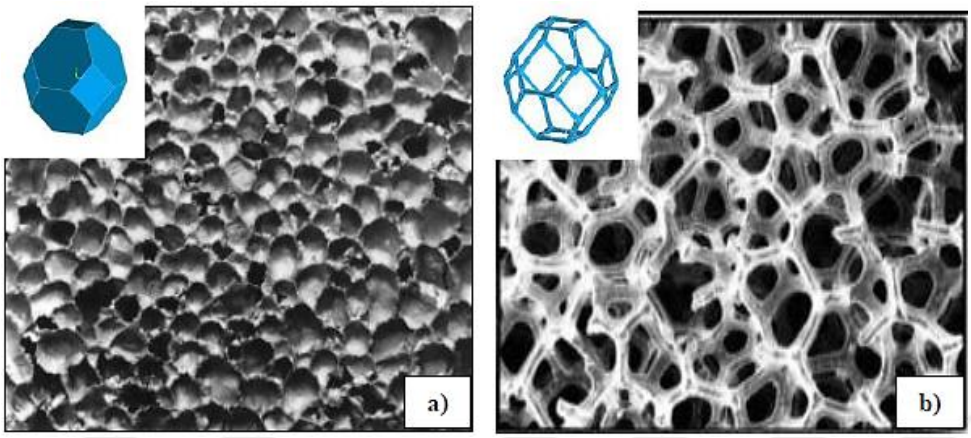
Metalik köpükler süngerler gibi köpük görünümlü gözenekli yapıya sahip metal malzemeden üretilmiş malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı ses ve enerji absorbesinin gerekli olduğu alanlarda metalik köpükler fonksiyonel olarak kullanılmaktadır. Ayrıca metalik köpük malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklarda yapısını koruması gibi özellikleri benzer yapıya sahip polimerik köpük malzemelere oranla çok daha üstündür. Geri dönüştürülebilir olmamakla birlikte, toksik değillerdir. Bu nedenle son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Kullanım alanları arasında, hafifliğin ve mukavemetin bir arada bulunması gereken otomotiv, uzay sanayi, demir yolu taşımacılığı, imalat makineleri inşaat sektörü gibi alanlar bulunmaktadır [76].

Tipik olarak metalik köpükler %80 ile %90 oranında gözenekli yapıya sahip, gaz ve katı halde bulunan maddelerin bileşimidir. Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için değişik fonksiyonel malzemeler kullanmak gerekmektedir. Özellikle üretimde homojen gözenek dağılımının ve dolayısıyla yeteri kadar gaz kabarcığının oluşturulması amaçlanır [77]. Gaz kabarcığı oluşumunda istenilen işlem, akışkan içindeki gazın balonlarının kaçmaması sağlanarak akışkanın soğutulması ve bunun sonunda sıvı köpüğün stabil duruma gelmesidir [78].

Metal yapılı köpükler yapısal olarak sahip oldukları gözeneğin; şekline, boyutuna, yoğunluğuna, anizotropik özelliklerine, açıklık ve kapalılık özelliklerine göre karakterize edilirler. Bu bağlamda sahip oldukları gözenek yapısına bağlı olarak sınıflandırıldıklarında kapalı (kapalı gözenekli köpük) ya da gözenekleri bir birine ağ şeklinde bağlı olan açık (açık gözenekli köpük) olmak üzere ikiye ayrılır (Resim 2.1) [79].

Sahip oldukları mekanik ve fiziksel özellikler köpüğü oluşturan ana metalin alaşımına, topolojisine (açık-kapalı gözenek, gözenek boyutu, gözenek duvar kalınlığı vb) ve göreceli yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu tür köpüklerin birbirlerine karşı birtakım üstün özellikleri söz konusudur. Örneğin; kapalı gözenekli metal köpükler, açık gözenekli yapılara göre daha rijit, dayanıklı, darbe ve ses sönümleme kabiliyetleri daha yüksektir. Dolayısı ile uygulama alanları da gözenek yapılarına göre değişkenlik göstermektedir (Resim 2.1). Kapalı gözenekli metal köpüklerin gözenek büyüklükleri ise genellikle 1-8 mm arasındadır. Akışkan dolugözenekler birbirlerinden sıvı ya da katı

yüzeyler ile ayrılmış durumdadırlar. Bu nedenle gözenekler katı ya da akışkan ile tamamen kaplanmış olup birbirlerine bağlı değildir [80].



Resim 2.1. Kapalı (a) ve açık (b) gözenekli metalik köpükler ve tetragonal gözenek modelleri [79]

Metalik köpük üretiminde alüminyum, çinko, demir, bakır, kurşun, nikel, magnezyum ve titanyum gibi metaller ve alaşımlar kullanılabilir. Özellikle alüminyum esaslı köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Diğer taraftan üretilen bu malzemeler (sandviç paneller, enerji sönümleme cihazları, ses yalıtım panelleri vb.) otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, ağırlıkça hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi gibi farklı alanlarda potansiyel uygulamalar için kullanılmaktadır [81].

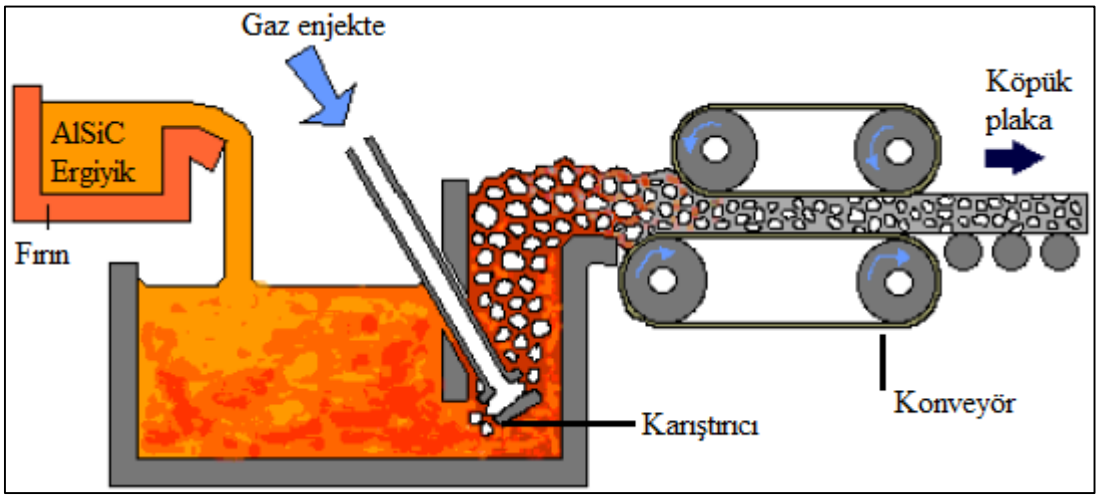
Günümüzde uluslararası literatürde üretilen açık ve kapalı gözenekli metalik köpüklere ait; Fominal (Frauenhofer, Bremen, Almanya), Alporas (ShinkoWire, Foamtech, Daegu, Kore), Alusion (Cymat, Mississauga, ON, Cananda), Aluhab (Aluinvent, Miskolc, Macaristan), Duocel® (ERG, Oakland, CA, ABD), Incofoam (Inco, Alantum, Seongnam-City, Kore), vb. gibi birçok köpük üretim yöntemlerinin özelliği olan bazı ticari isimler oluşturulmuştur [82].

2.4.1. Kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin üretim yöntemleri

Alüminyum metalik köpük üretiminde ergiyik içerisine gaz enjekte edilmesi, ergiyik içerisine köpürtücü madde ilavesi ve toz metalurjisi başta olmak üzere birçok metal esaslı köpük üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanlar ergiyik yöntem, köpürebilir metalik malzemelerin köpürtülmesi ve toz metalurjisidir.

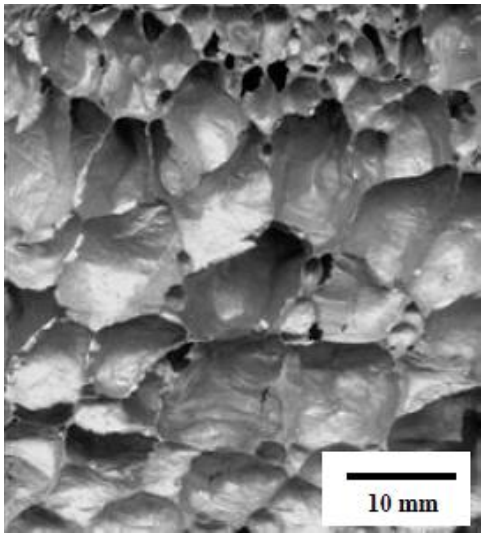
Ergiyik metal içerisine gaz enjektesi ile metalik köpük üretimi

Ergiyik metal içerisine gaz enjektesi ile metalik köpük üretimi yönteminde ilk adım silisyum karbür, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit gibi seramik parçacıklar ilave edilerek ergiyik metalin viskozitesini artırmak ve hazır hale getirmektir. İkinci adım ise ergiyik içerisine özel pervane veya titresim nozulu yardımıyla gaz (hava, azot, argon) enjekte edilmesidir. Böylece ergiyik içerisinde homojen olarak dağılmış çok ince gaz baloncukları oluşur (Şekil 2.16). Baloncukların ve ergiyik metalin oluşturmuş olduğu karışım konveyör yardımıyla çekilerek soğumaya bırakılır.



Şekil 2.16. Gaz enjekte edilerek doğrudan köpük üretim yöntemi [51]

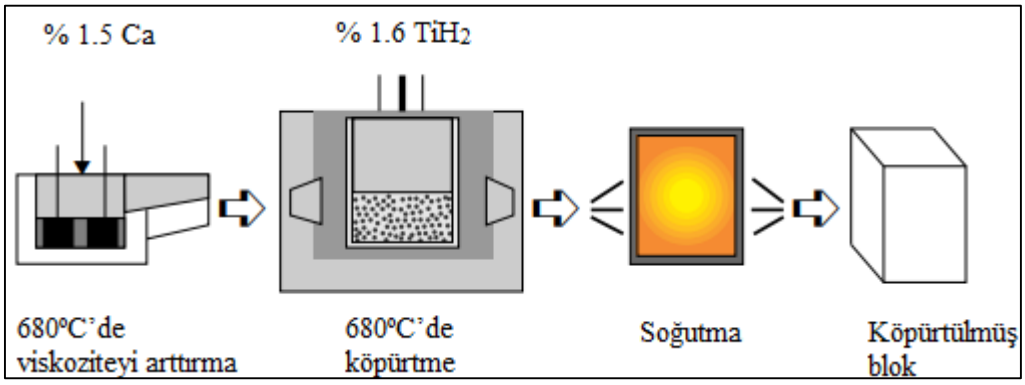
Bu yöntemde elde edilen seramik parçacıklar ve ergiyik metalden oluşan metal matrisli kompozitlerin gözenek yapısının homojen olmasını sağlamak için seramik parçacıkların hacimsel oranının %10-20 ve boyutlarının 5-20 μm olması istenir. Partikül hacim oranı ve partikül tane boyutun bağlı olarak çok küçük veya çok büyük gözenek boyutu elde edilebilir (Resim 2.2). Üretilen alüminyum köpüğün yoğunluğu 0,069 g/cm³ ile 0,54 g/cm³ arasında değişmekte, ortalama gözenek boyutları 3-25 mm ve gözenek duvar kalınlığı 50-85 μm arasında olmaktadır.



Resim 2.2. Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilen bir metalik köpüğün optik mikroskop görüntüsü [83]

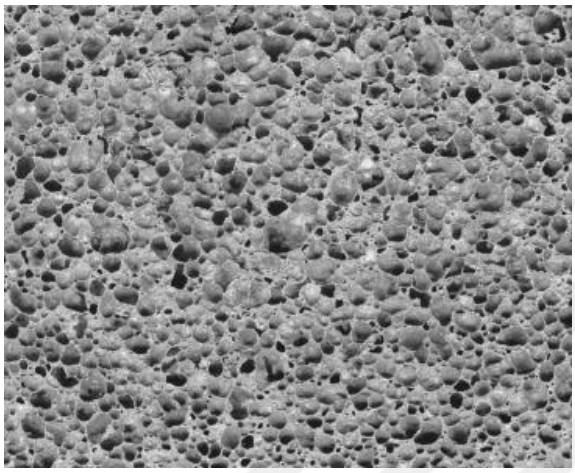
Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilave edilerek metalik köpük üretimi

Bu yöntemde, köpürtülecek metal veya alaşım sabit sıcaklıkta ergiyik haline getirilir. Ergiyiğin viskozitesini ayarlamak için 680 ºC'de kalsiyum, kalsiyum oksit, kalsiyum alüminyum oksit ($CaAl_2O_4$) veya Al_2O_3 ilave edilir. Ergiyik istenen düzeye ulaştıktan sonra içerisine gaz enjekte etmek yerine direkt olarak köpürtmeyi sağlamak için köpürtücü madde olarak TiH_2, ZiH_2 veya $CaCO_3$ gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme işlemi gerçekleştirilir. Köpürtücü madde belli bir ayrışma sıcaklığında çözünerek ayrışır, H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkar ve ve köpük oluşumu sağlanır. Köpürtme işlemi yaklaşık 15 dakika sürer [84]. Bu işlemin akış şeması Şekil 2.17'de görülmektedir.



Şekil 2.17. Köpürtücü madde ilavesi ile ergiyik metalin doğrudan köpürtülmesi [85]

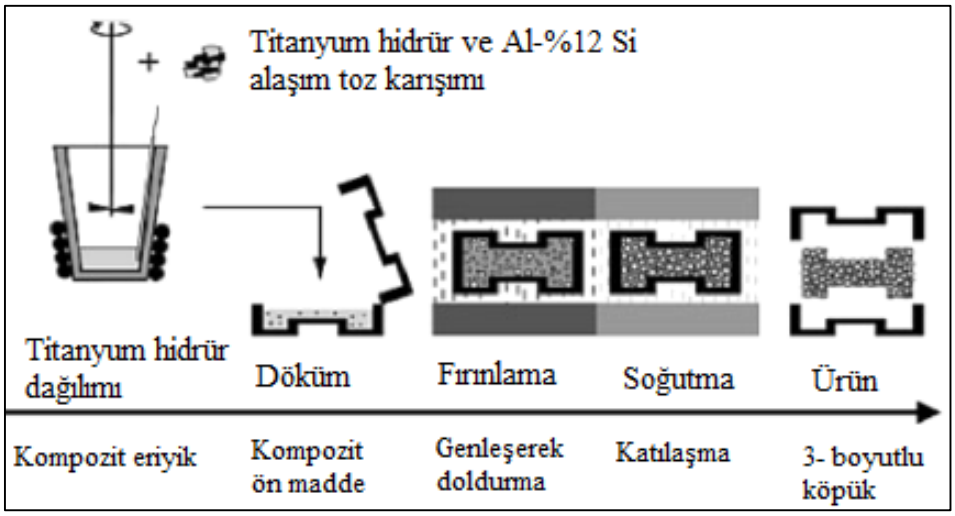
Köpürtücü madde ilavesi ile üretilen metalik köpük blok 2050 mm x 650 mm x 450 mm boyutlarındadır. Malzemelerin bağıl yoğunluk değeri 0,18 ila 0,24 g/cm^3 arasında olmakla birlikte, gözenek boyutu 2-10 mm ve gözeneklilik oranı %84-93'tür. Bu üretim yönteminde işlem parametrelerinin çok dikatlice ayarlanması ile homojen bir yapıya sahip metalik köpük üretimi gerçekleştirilebilir. Resim 2.3'de bu yöntemle üretilmiş homojen bir köpüğün gözenek morfolojisi gözükmektedir [86].



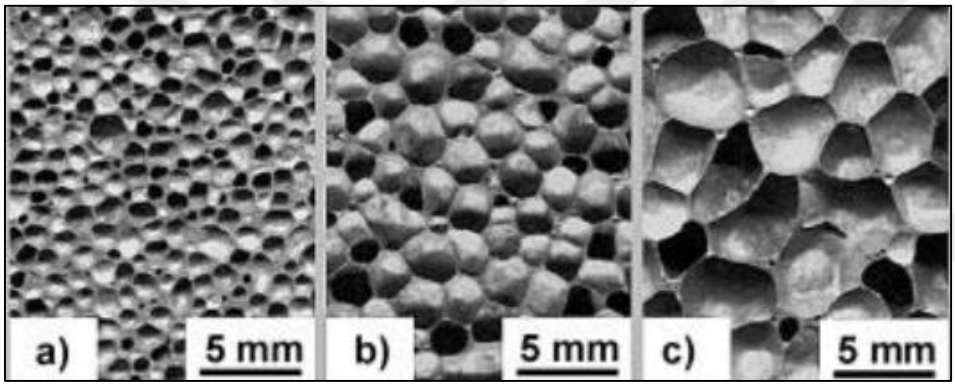
Resim 2.3. Alporas yöntemiyle üretilen köpük malzemeye ait gözenek yapısı [84]

Formgrıp yöntemi

Toz metalurjisi ve ergitme yöntemlerinin bir arada kullanılması sonucu gözeneklerin oluşturulması Formgrip yöntemi olarak adlandırılmıştır. Yöntemin ilk aşamasında, TiH_2 tozları atmosfer ortamında ısıl işleme tabi tutulur. Bu sayede titanyum oksit filmi oluşumu sağlanır ve bu tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Isıl işleme tabi tutulmuş köpürtücü tozları, Al esaslı alaşım tozları ile ağırlıkça 1/4 oranında karıştırılır ve yaklaşık 620ºC de ergiyik hale getirilmiş ve yavaş soğutulmuş Al esaslı kompozit alaşımın içine ilave edilerek karıştırılır (Şekil 2.18). İkinci aşamasında, karışım TiH_2'ün hidrojen gazının salınıp çözünmesi için ısıl işlem uygulanarak köpük elde edilir. Formgrip yöntemiyle üretilen bir metalik köpüğün gözenek yapısı Resim 2.4'de gösterilmiştir [87].



Şekil 2.18. Formgrip üretim yönteminin şematik gösterimi [87]



Resim 2.4. Formgrip yöntemi ile üretilmiş numunelerin gözenek yapıları [87]

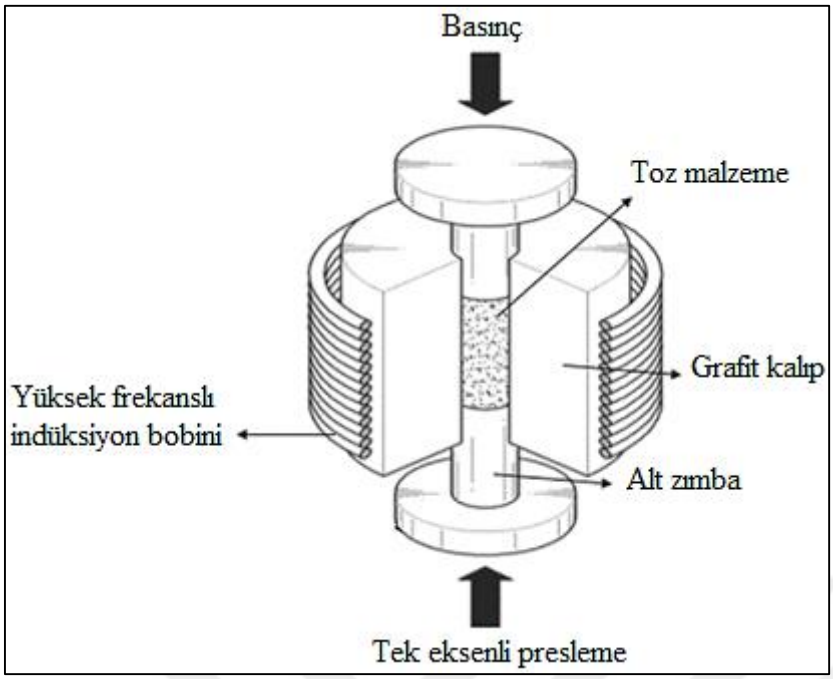
Toz metalurjisi yöntemi

Bu yöntemin başlangıç malzemesi metal tozları olduğundan toz metalurjisi (TM) yöntemi olarak bilinmesine rağmen metalik köpük malzeme, metal tozlarının sıkıştırılması ile oluşturulduğundan dolayı "sıkıştırılmış tozların köpürme yöntemi" olarak da anılmaktadır. Toz metalurjisi TM ile metalik köpük üretim yöntemi Almanya'da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü'nde (IFAM/Bremen) geliştirilmiştir (Şekil 2.19). Üretim işlemi oldukça eskiye dayanmasına rağmen son zamanlarda oldukça kaliteli ve memnun edici metalik köpük üretimi gerçekleştirilmektedir [80].



Şekil 2.19. IFAM toz metalurjisi işlem sırası [88]

TM yönteminde preform malzeme üretimi için iki farklı yöntem söz konusudur. Bunlardan biri soğuk pres, diğeri sıcak pres yöntemidir. Soğuk pres metodunda presleme işleminden sonra sırasıyla sinterleme, sıcak ekstrüzyon ve haddeleme işlemlerinden sonra köpürtme işlemi yapılır. Sıcak pres metodunda ise presleme işleminden sonra köpürtme işlemi uygulanır. Sıcak pres metodunu soğuk pres metodundan ayıran özellik, eş zamanlı presleme ve sinterleme işlemlerinin gerçekleşmesi ve tama yakın yoğunluk (%90) elde etmektir. Sıcak presleme, gerilme destekli yoğunlaşmanın bir ifadesidir. Kalıpta yapılan sıkıştırmaya benzer bir şekilde, sıcak presleme de Şekil 2.20'de gösterildiği gibi tek eksenli sıkıştırma uygulanarak bir kalıp içinde yapılır. Grafit kalıplar indüksiyon ile ısıtmaya uygundurlar [89].

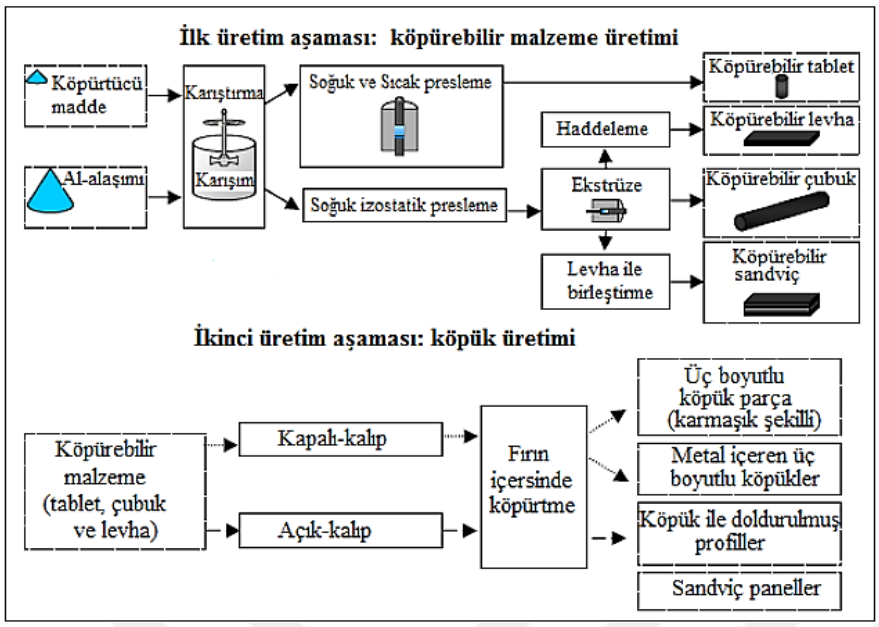


Şekil 2.20. Tek eksenli presleme işlemi kesit görünüşü [90]

TM yöntemi ile sıcak presleme işleminde aluminyum veya aluminyum alaşım tozlarının köpürtücü madde tozlarıyla (genellikle TiH_2, ZrH_2, $CaCO_3$) karıştırılmasıyla başlar. Karışım belirlenen sıcaklıklarda sıcak olarak kalıpta preslenir. Preslenen karışım ekstrüze edilip yarı mamul haline getirilir ve haddelenir. Haddelenen parçada köpürtücü madde homojen olarak dağılmış olur. Ekstrüzyon veya haddeleme öncesi tozların soğuk olarak preslenmesi daha uygun olur. Karışım toz kalıp içerisinde sıkıştırılarak yoğunluk kazandırılmış katı bir ürün elde edilir bu ürüne köpürebilir preform malzeme denir.

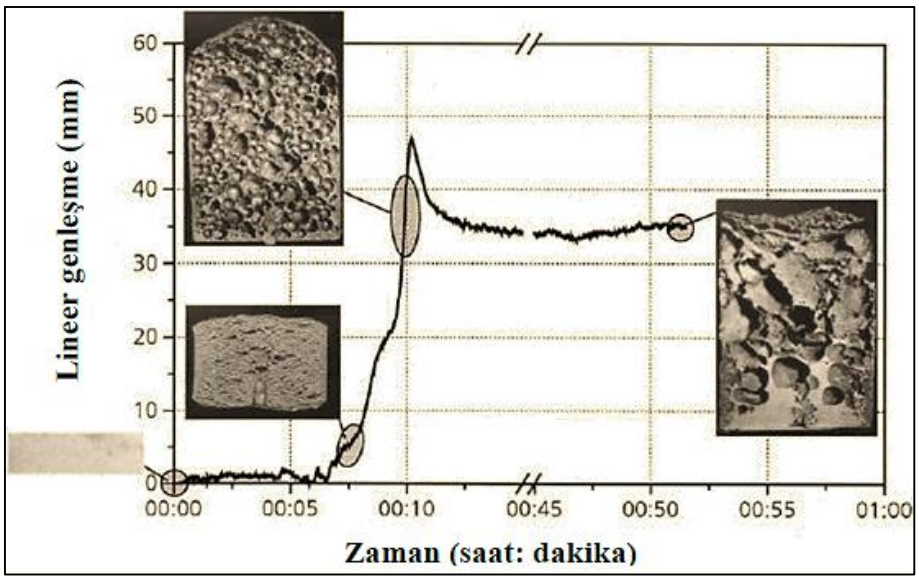
Daha sonra elde edilen numune, matris malzemenin ergime sıcaklığına yakın sıcaklıkta ısıtılarak içerisindeki köpürtücü madde ayrışır ve gaz çıkışı meydana gelir. Gaz çıkışı ergiyik metalin köpürmesini ve gözenekli yapıya dönüşmesini sağlar [83].

Metalik köpüklerin toz metalurjisi yöntemi ile üretim aşamaları Şekil 2.21'de şematik olarak gösterilmiştir.



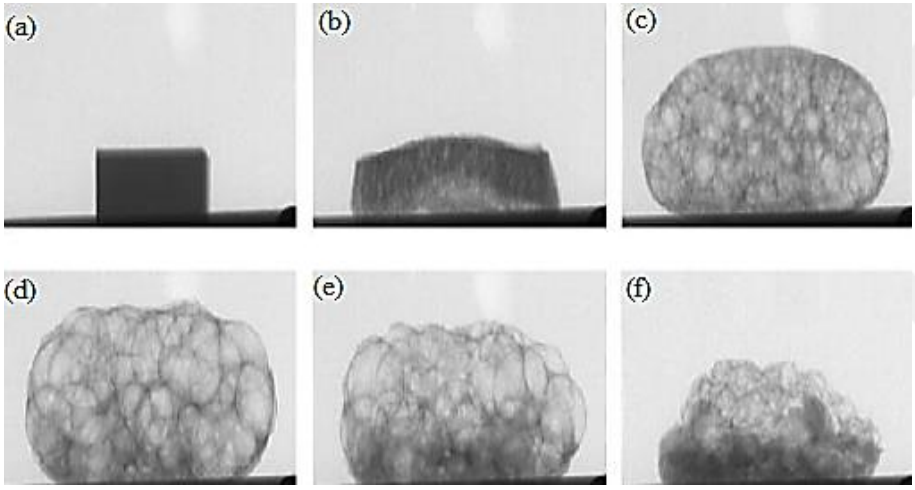
Şekil 2.21. Metalik köpüklerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi [91]

Köpürtme işlemi şu şekilde meydana gelmektedir; köpürebilir öncü malzeme fırın içersinde ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ısıtılırken yapı içerisindeki köpürtücü madde genellikle TiH_2 ayrışarak hidrojen gazı açığa çıkararır yapı içerisinde hapsolan hidrojen gazları ise gözeneklerin oluşmasını sağlar (Şekil 2.22). Sıcaklığın artmasıyla ve gözenek boyutları da belli bir noktaya kadar artarak devam eder. Yeterince köpüren malzeme soğutularak kararlı hale gelmesi sağlanır bu sayede metalik köpük malzeme elde edilmiş olur.



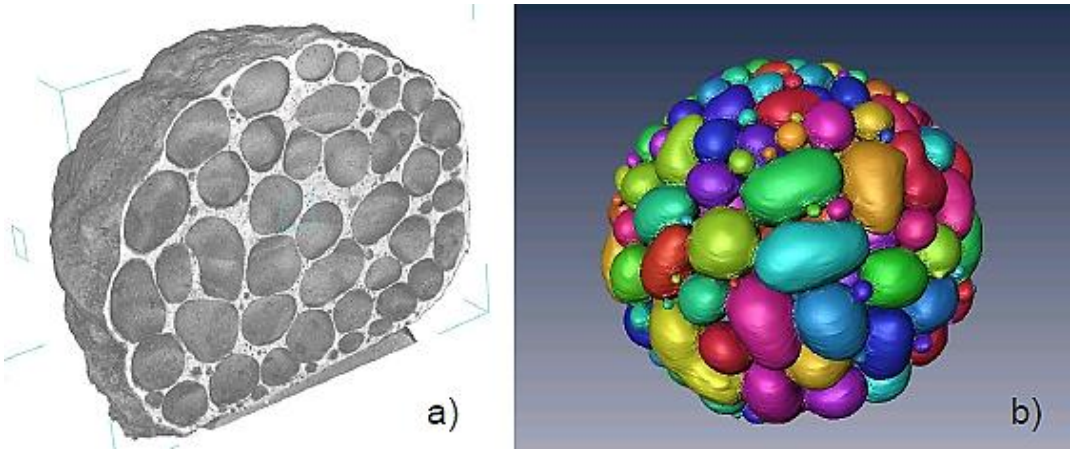
Şekil 2.22. 750°C sıcaklıkta köpürtme işlemi uygulan Al/TiH_2 karışımının lineer genişleme davranışı [80]

Şekil 2.23'de Al esaslı metalik köpüğün oluşum safhasındaki köpürme esnasındaki değişimler X-ışını tomografisinde çekilen görüntüsü görülmektedir. Saf Al, köpürebilir köpürtme fırınında numune ergime noktasının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmış ve orada bekletilmiştir. Şekil 2.23'de fırında tutma süresine bağlı olarak gözeneklerin oluşum morfolojisi görülmektedir. İlk başta TiH_2 ayrışmaya başlar ve ince ufak gözenekler oluşur daha sonra ise daha fazla TiH_2 ayrışmasına bağlı olarak gözenekler büyüyerek daha fazla lineer genleşme sergilerler belli bir süre sonra ise maksimum lineer genleşmeye ulaşınca gözenekler kırılır veya birleşerek büzülüler bu olaya metalik köpüklerde çökme olayı denilmektedir.



Şekil 2.23. Isıtma başladıktan sonra (a) 0 s, (b) 48 s, (c) 60 s, (d) 72 s, (e) 92 s ve (f) 200 s köpürme süresinde oluşan yapılar [86]

Yüksek çözünürlüklü X-ışını tomografisinin metalik köpüklerin kompleks yapısını karakterize etmek için geliştirilmiştir. Şekil 2.24'de bir metal köpüğün bu tekniklerle 3D'de görselleştirilmiş bir örneği görülmektedir.



Şekil 2.24. a) AlMgCu alaşımlı metalik köpüğün X-ray tomografik görüntüsü b) Her bir gözeneğin bilgisayar destekli bölümleme ile oluşturulan görüntüleri [92]

Resim 2.5'de toz metalurji yöntemi ile üretilmiş farklı boyut ve şelillerdeki malzemeler görülmektedir.



Resim 2.5. Toz metalurji yöntemi ile üretilmiş köpük malzemeler [93]

2.4.2. Kapalı gözenekli metalik köpüklerin şekillendirilmesi ve ikincil işlemler

Köpük olarak ifade edilen terim esas olarak gaz kabarcıklarının akışkan faz içinde hapsolması anlamına gelmektedir. Üretilen metalik köpük malzemeler bir dış katman yüzeye sahiptirler. Bu yüzey, atmosferden köpük içerisine ısı alışverişine engel olmaktadır. Bunun anlamı açık gözenekli yapıda bulunmayan bir dış yüzey ile şekillendirilmiş olmalarıdır. Şekillendirme işlemi katılaşma sıcaklığının altındaki yüksek sıcaklıkta kayma gerilmeleri azalırken şekillendirme limitleri artar. Yüksek sıcaklıklardaki şekillendirmeler

metalik köpüklerin hatasız ve gözenekli yapıyla şekillendirilmelerine olanak sağlamakta ve şekillendirme yüksek sıcaklıkta daha erken elde edilmektedir. Metal esaslı köpüklerin katılaştırılmasıyla biçimlerinin korunması mümkündür ve bu şekilde katı köpük olarak belirtilen yapı üretilir [78].

Halen gözenekli metallerin ergiyikten çökelme ve katı hal işlemleri ile üretilmeleri mevcuttur. Fakat kullanım oranları, şekillendirmenin veya bitmiş parça imalatının zorluğu ile sınırlıdır. Günümüzde haddelenmiş köpürebilir yarı mamul ürünlerden gözenekli alüminyum çekirdekler ile üç boyutlu kompozitler yapmak mümkündür. Bu yöntem toz metalurjisi köpürtme tekniği üzerine temellendirilmiştir ve oldukça maliyetlidir. Ergiyik yöntemle üretilen köpükler toz metalurjisi köpürtme tekniği ile üretilenlerden çok daha ucuzdurlar. Fakat köpürtülmüş gözenekli metallerin şekillendirme özellikleri ile ilgili problemler vardır.

Sıcaklık, şekillendirme işleminde önemli bir yer tutmaktadır. TiH_2'li alüminyum köpüklerinin şekillendirilmesi için katılaşma sıcaklığın altında çalışmak gerekir ki gözenek yapısı çökmeden korunabilsin, çünkü bu işlemde ana faktör şekillendirme kuvvetidir. Eşik değerin kontrol altında tutulduğu şekillendirme işleminde bu sıcaklığın üstünde malzemenin şekillendirilmeleri mümkün değildir. Çünkü çok küçük şekillendirme kuvvetleri bile gözenekli yapıya zarar vermektedir. Öte yandan yüksek deformasyon oranlarına ulaşmak için akma gerilmesini azaltacak sıcaklığa ulaşılmalı ancak katılaşma sıcaklığı aşılmamalıdır [94].

Ortam sıcaklığında köpüklerin şekillendirilmesi deforme olan bölgedeki çatlakların artmasına ya da gözenek yapısının çökmesine neden olmaktadır. Lokal gerilme-gerinim konsantrasyonları gözenekli yapının en zayıf kısımlarında hataya neden olmaktadır [95].

Yüksek sıcaklıklardaki şekillendirmeler metalik köpüklerin hatasız ve gözenekli yapıyla şekillendirilmelerine olanak sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda akma gerilmesi ve deformasyon sınırları kayda değer biçimde azalmaktadır, böylece akma gerçekleşmektedir. Lokal gerilme konsantrasyonları sürünme gevşemesi ile azaltılmaktadır [87].

Kapalı gözenekli Al metalik köpükler, katılaşma sıcaklığının (yarı-katı sıcaklığı) $\cong$ 640-660 °C arasında olduğu belirlenmiştir. Katılaşma sıcaklığının 15 °C üzerindeki

sıcaklıklarda yerçekimi etkisiyle serbest halde kalıpta şekillendirme çalışmalarının yapılabileceği belirtilmiştir [96].

Sanayide kullanım alanı artan kesme, delme ve talaşlı imalat gibi ikincil işlemlerin her geçen gün daha da önem kazandığı kapalı gözenek yapılı ve sandviç tip alüminyum köpük malzemeleri lazer ve tel erezyon yöntemleri ile kesim işlemlerine tabii tutulmuş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında lazer yöntemi ile kesmenin özellikle ince köpük malzemelerde ve yüksek hız istenen yerlerde etkili olduğu belirlenmiştir. Belirli hız ve parametre değerlerinde lazerle kesmede alüminyumun ergiyip boşluklara dolduğunu ve çapak oluşturduğu, tel erozyonla kesmenin ise hassasiyet ve gözenek yapısının korunması gerektiği yerlerde öne çıktığı fakat lazer kesime göre ortalama 200 kat daha yavaş olduğunu vurgulanmıştır [97].

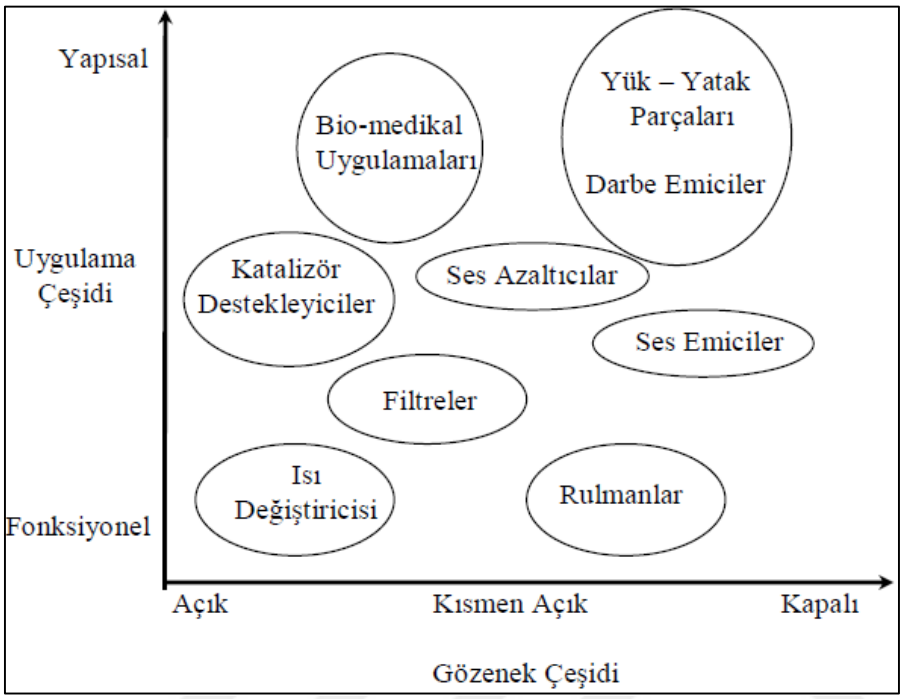
2.4.3. Metalik köpüklerin kullanım alanları

Metalik köpükler, son zamanlarda farklı mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulan ve oldukça ilgi çeken malzemelerdir. Metal esasalı köpükler içerisinde Al köpükler oldukça büyük bir öneme sahiptir. Al esaslı köpükler; ısı değişimi, ses yalıtımı, ses ve enerji absorbsiyonu gibi özellikleri ile bilinir. Kullanım alanları arasında, özellikle hafifliğin arandığı otomotiv ve uzay sanayisi gibi alanları başta gelmektedir [96].

Metal esaslı bir köpüğün kullanılabilir olması bir takım özelliklere bağlıdır. Bunlar morfoloji; istenen gözenek tipi (açık, kapalı), istenen gözeneklilik oranı, uygun gözenek boyutu, metal köpüğün toplam iç yüzey alanıdır. Metalurji; istenen metal, alaşım ya da mikro yapısal haldir. Proses; köpüğün şekillendirilebilirliği ya da köpük ve geleneksel levha ya da profillerle kompozit olarak üretilebilirliğidir. Ekonomi; üretim maliyeti, geniş hacimde üretime uygunluğudur [98].

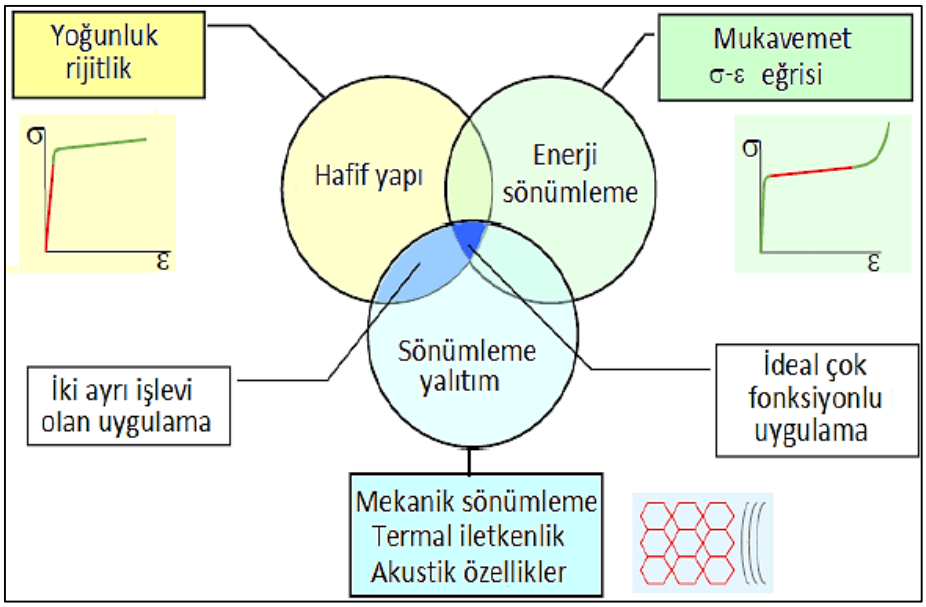
Metalik köpükler, gözenek yapısına göre (açık veya kapalı oluşu) kullanım alanları, gözenek yapısı ve uygulama alanlarına göre (yapısal ve fonksiyonel) olarak sınıflandırabilir. Gözenekler birbirlerinden bağımsız halde, bir başka deyişle, her bir gözenek, gözenek duvarı ile birbirinden ayrılmış ise bu tip köpükler kapalı gözenekli köpükler olarak adlandırılır. Açık gözenekli köpük ise gözenekleri arasında bağlantı olan köpüklere denir.

Şekil 2.25'de metalik köpüklerin gözenek türüne göre kullanıldığı alanları gösterilmiştir. Açık gözenekli köpükler daha çok ısı değiştirici olarak kullanılırken, gözenek türü kapalı olanlar daha çok mukavemet gerektiren yapısal alanlarda kullanılmaktadırlar [99].



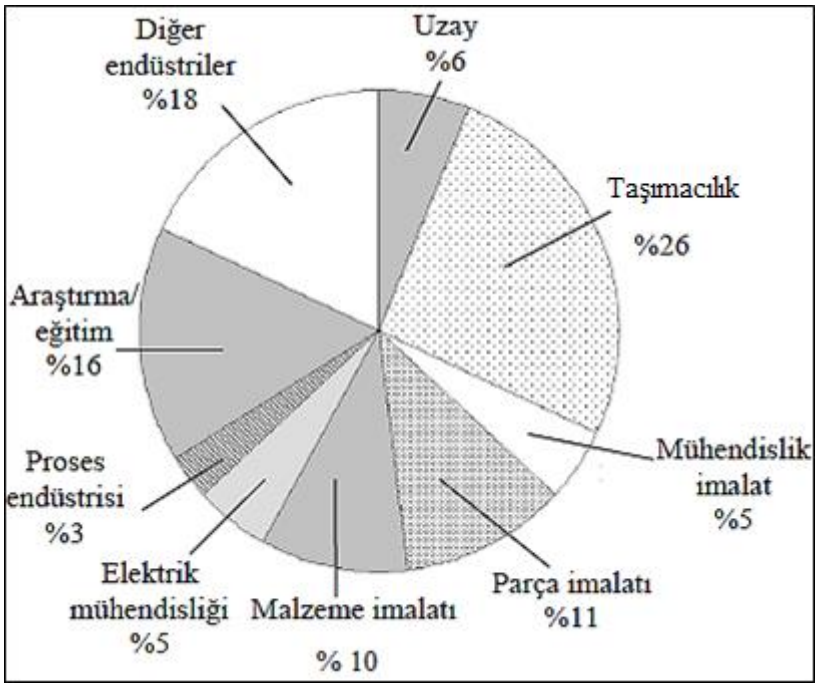
Şekil 2.25. Gözenek yapısına göre metalik köpüklerin kullanım alanları [99]

Metal köpükler geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadırlar. Şekil 2.26'da alüminyum köpüklerin uygulama alanları gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Alüminyum köpüklerin uygulama alanları [100]

Son dönemde, yapılan araştırmalara göre metal köpüklerin yakın bir zamanda otomobil ve uzay endüstrisi için %32, imalat endüstrisi için (malzeme, makine, parça) %26, eğitim ve araştırma sektörlerinde ise %16'lık paya sahip olacağı belirtilmiştir. Şekil 2.27'de metalik köpük uygulamalarının endüstriyel sektör gereksinimlerindeki dağılımı gösterilmiştir [101].



Şekil 2.27. Metalik köpük uygulamalarının endüstrilerdeki sektörel dağılımı [101]

Metalik köpüklerin akustik özellikleri açısından kullanımı

Alüminyum köpükler titreşimleri ve ses dalgalarını, belirli koşullar altında absorbe etme özelliğine sahiptirler. Metalik köpüklerin elastisite modülü yapıldıkları metale göre daha düşük ve kayıp faktörü en az 10 kat daha fazladır, böylece titreşimleri sönümleyebilirler. Köpüğe gelen ses dalgalarının bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı da yapıya girer. Giren dalgaların bir kısmı yutulur ve bir kısmı da iletilir. Metal köpükler bazı frekanslarda %99 ses yutumu yapabilir. Fakat bu özellikler çok iyi değildir. Örneğin polimer köpükler daha iyi ses yalıtım malzemeleridir. Ancak, metalik köpükler başka özellikleri ile beraber kullanıldığı zaman tercih edilebilirler [78].

Isıl özellikleri açısından kullanımı

Metalik köpükler iletken, geçirgen ve yüksek yüzey alanına sahiptir. Ayrıca ısıl iletkenlikleri düşüktür ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar. Bu özelliklerin kombinasyonu onları çeşitli ısıl uygulamalar, ısı değiştiriciler, ısı emiciler, ısı boruları ve ısı yalıtımı için çekici hale getirir. Günümüzde çeşitli araştırma merkezleri, farklı yapılara sahip metal köpüklerde ısı transferi ve ısıl değişimlerin karakterizasyonu ve modellenmesi üzerinde çalışmaktadır. Metalik köpüklerdeki ısı değişimleri ve iletimi karmaşık olgulardır. Isı değişim verimi, köpüğün iletkenliğinden, köpük ile çevreleyen akışkan arasındaki ısı alışverişinden ve köpük içindeki basınç düşüşünden etkilenir.

Bu özelliklerin tümü, ölçülmesi ve entegrasyonu zor olan çeşitli yapısal parametrelerden yoğunluk, gözenek büyüklüğü dağılımı, gözenekler arası bağlantı, kıvrımlılık, yüzey pürüzlülüğü vb. etkilenir. Buna göre, metalik köpüklerin ısıl özellikleri ve etkinliği hala çok iyi tanımlanmamıştır. Devam etmekte olan araştırma ve geliştirme çalışmaları, bu materyallerin ısıl uygulamalardaki performansını daha iyi değerlendirmek için mühendisler ve tasarımcılar için yeni veri ve araçlar sağlayacaktır [92].

Otomotiv endüstrisinde kullanımı

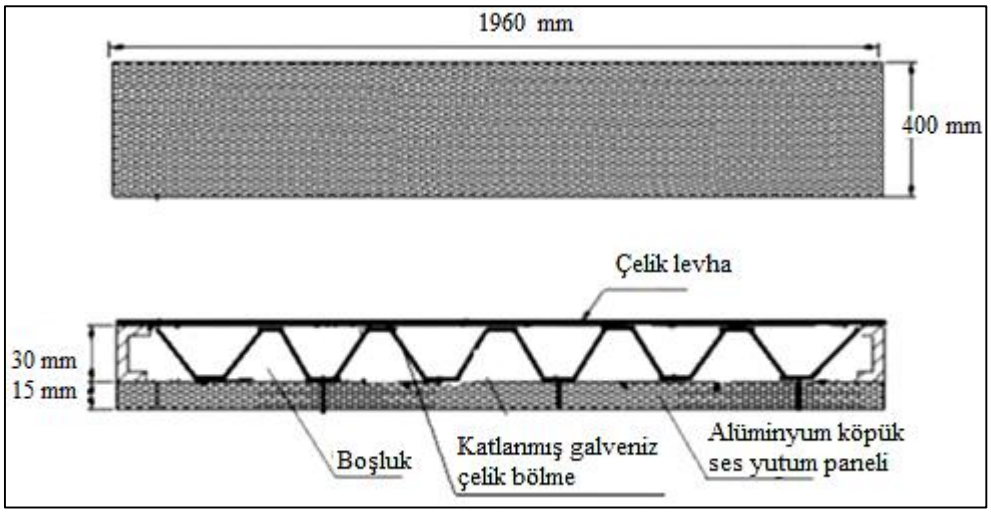
Ses yalıtımı ve yutumu otomotiv endüstrisi için çok önemli bir konudur. Alüminyum esaslı köpükleriyi ses yalıtım özelliklerinden dolayı bu sektörde kullanılmaktadırlar. Otomobillerde araç içi ve dış kaynaklı sesi (gürültüyü) azaltmak için ses yutucu malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Metal köpükler bu problemlerin bazılarına çözüm olabilir. Hafif panel, çarpışmada enerji soğurması, ses ya da ısı soğurması için kullanılabilir. [98].

Özellikle araç sanayindeki bir çok yapısal uygulamada kapalı gözenekli metalik köpükler kullanılır. Alüminyum köpük metaller, özellikle yüksek enerji sönümleme yetenekleri çok iyi derecedeki mekanik, akustik, ısıl, elektriksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, yapısal ve fonksiyonel ürünler olarak otomotiv sektöründe geniş bir oranda uygulama alanı bulmuştur. Araçların motor kısmında alüminyum köpük malzemeler, ısı ve ses yalıtkanlığı özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Taşıtlarda iç ve dış paneller, alüminyum levha uygulamalarıyla önemli hafifleme sağlayan ve taşıt ağırlık azaltma çalışmalarına büyük

katkıları olan parçalardır. Bugün Kuzey Amerika'da General Motors'un Precept, Ford'un Prodigy, Daimler-Chrysler'ın ESX3 modelleri ve Tesla Motors'un Model S ve Model X araçları, Avrupa'da ise Audi'nin A8 ve A2 modelleri tamamen alüminyum gövdeli olarak üretilmektedir [102].

Demiryolu endüstrisinde kullanımı

Metal köpükler metro tünellerinde, demiryolunda ve tünel ve istasyon duvarlarında ses yutumu, yüksek hava basıncı değişimleri ve titreşimi sönümleme ve yanıcı olmamasından dolayı tercih edilmektedir. Yüksek hızlı tren ray hattı gürültüsü yaklaşık olarak 1000 ~ 2000 Hz frekans aralığında gerçekleşmektedir. Bu gürültüyü azaltmak için kullanılan alüminyum köpük ses kutusu 10 ~ 15mm kalınlığında köpük alüminyum ses yutum levhası ve ortada katlanmış tip galvanizli çelik bölme levhadan yapılmıştır. Boşluğu 0 ~ 30 mm'dir. Arka plan, Şekil 2.28'de gösterildiği gibi 1 mm kalınlığında galvanizli plakadan yapılmıştır. 500Hz ~ 2000Hz yüksek hızlı ray gürültüsünün frekansını adapte etmek için bu tür bir ses bariyeri, 20 dB'den daha fazla gürültüyü azaltabilir. Şekil 2.28'de yüksek hızlı tren hattı üzerinde alüminyum köpük yapılmış ses bariyeri ve kesit görünüşü görülmektedir [103].



Şekil 2.28. Alüminyum köpük ses bariyerinin ses yutum panel yapısı [103]

Karayolu üzerinde alüminyum köpük ses bariyeri

Alüminyum köpükler ses yalıtımı ve yutumu sayesinde viyadüklerde, otobanlarda ses yutum bariyeri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Resim 2.6'da Shneyang'da inşa edililen,

alüminyum köpük ses bariyeri 800mmx 2000mm, 70mm boşluğa sahip ve 20dB gürültüyü azaltılabilmektedir.



Resim 2.6. Shneyang'da kullanılan alüminyum köpük ses bariyeri [103]

Yol kenarında ve viyadük altında levha halinde kullanılan kapalı gözenekli alüminyum metal köpük viyadük altından geçen araçların seslerini absorbe ederek gürültü kirliliğini azaltmaktadır (Resim 2.7) [99].



Resim 2.7. Japonya'da yol kenarında alüminyum köpük ses yutum panelleri [104]

Havacılık ve uzay sanayisinde kullanımı

Çok kaliteli açık gözenekli metal köpükler, gözle görülmesi mümkün olmayacak kadar küçük gözeneklerle sahiptir. Üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, genel olarak ileri teknoloji uygulamaları, havacılık ve uzay sanayisinde kullanılırlar.

Boeing firması gaz hapsetme yöntemiyle geniş titanyum metalik köpük sandviç ve alüminyum köpük sandviç parçalar yapmıştır. Alüminyum köpükten üretilmiş plaka ve sandviç paneller, özellikle çok pahalı olan bal peteği (Honeycomb) yapılı kompozit malzemelere alternatif olarak kullanılabilmektedir. Boeing alüminyum köpük esaslı alüminyum sandviç panelleri helikopter kuyruk çubukları olarak kullanılmaktadır. Bu sandviçlerin en büyük avantajı, düz bal peteği yapılı kompozit malzemelerin aksine açılı ve 3 boyutlu olarak üretilebilmeleridir. İleriki uygulamalar, yüksek peklik ve arttırılmış sönümlemenin önemli olduğu türbinlerde yapısal parçalar olarak kullanılmalarıdır. Uçakların jet türbinlerinin aerodinamik gürültü azaltma uygulamaları metalik köpük kullanımı için çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca, Lockheed Martin F-22 savaş uçaklarında hızlı irtifa değişiklikleri sırasında basınç tahliyesi için kullanılan havalandırma tapası, elektromanyetik koruyucu kalkan ve nem fitili Al ve Cu esaslı açık gözenekli köpükler'den yapılmıştır. Uluslararası Uzay istasyonu International Space Station (ISS)'de Al köpükten yapılmış bir ısı değiştiricide, uzay mekiği içindeki karbon dioksit ve nemi gidermek için çok katmanlı filtre tabakalarından oluşan granülleştirilmiş kimyasalların destek matrisi olarak Al köpük kullanılmaktadır.

Üniform ısıtma ve soğutma sağlamak için uydu kriyojenik tanklarında ana bileşen olarak açık gözenekli alüminyum köpük kullanılmıştır. Katı kriyojenik soğutucular kullanan uzay tabanlı kızılötesi optikler, izotermalizerde bölme yapısı olarak da açık gözenekli alüminyum köpük kullanılır. Katı bir kriyojeni sabit bir sıcaklıkta tutmak, kızılötesi optiklerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar [82].

Bina endüstrisi ve mimari uygulamalarda kullanımı

Aüminyumun en çok kullanıldığı bu sektörde, bina cephelerine giydirme amaçlı, ara bölme ve çatı kaplamalarında ise yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. Alüminyum köpük ya da köpük paneller kullanılarak ısı enerji sarfiyatı azaltılabilir ve ses yalıtımı ve gürültü kontrolü sağlanabilir. Alüminyum köpük ses yutum paneli (20 mm kalınlık) ses yalıtım kaplaması, Shenyang'daki bir binanın bodrum katı tavanına monte edilmiştir (Resim 2.8). Ortalama gürültü azaltımı 26 dB olarak hesaplanmıştır.



Resim 2.8. Alüminyum köpük ses kaplaması [103]

Ses yalıtımı ve ses yutum özellikleri nedeniyle Japonya'da prefabrik yapıların inşasında alüminyum köpük kullanımı sisteme avantajlı özellikler kazandırmaktadır (Resim 2.9).



Resim 2.9. Al köpük ses yutum panellerinin prefabrik yapıların yalıtımında kullanımı [78]

Alüminyumun ergime noktasının düşük olmasına karşın (~640 ℃) alüminyum köpükler ateş karşısında oldukça stabildirler. Bu nedenle Alüminyum metal köpükler bina ve inşaat uygulamalarında iyi bir yangın direnci ve ısı yalıtım özelliklerinden dolayı kullanımı imkânı bulmaktadır.

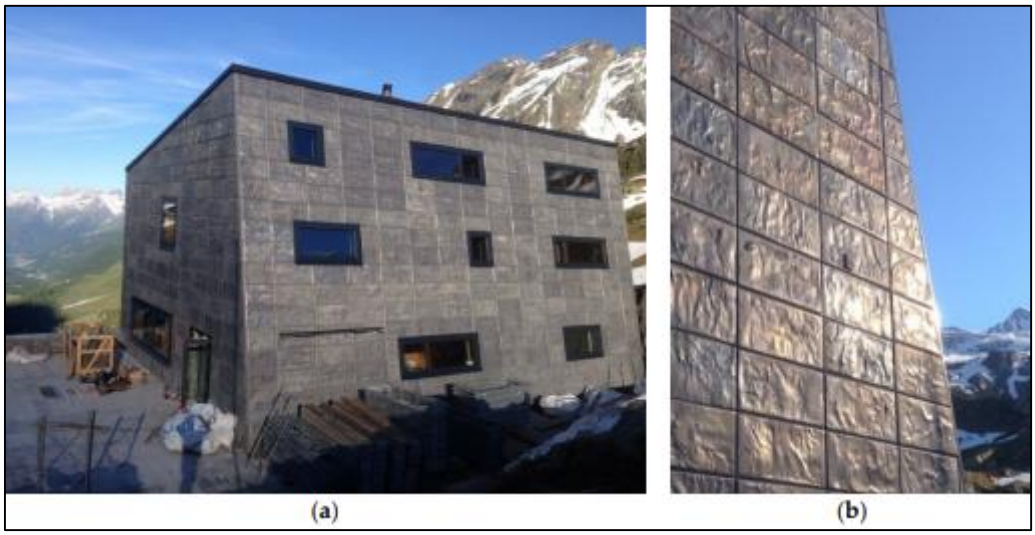
Örneğin, köpük parçalar veya köpük dolgulu paneller binaların dış cephelerinde veya binaların iç duvarlarında kaplama elemanı olarak kullanılabilir. Her iki durumda da, alüminyum köpükler iyi ısı yalıtım özelliklerinden dolayı enerji tasarrufu elemanları olarak hizmet edebilirler. Metalik köpüklerin kapalı ve açık gözenekli yapısı köpük yüzeylerini

mimari tasarım uygulamaları için benzersiz ve çok çekici hale getirir. Kabarcıklı bir yüzeye sahip kapalı ve açık gözenekli köpükler farklı boyutlarda kesilerek kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalara örnek olarak Gürcistan, Tiflis şehir merkezinde ve Terrasa, İspanya'da bir Protestan kilisesinde 12.000 m²'lik bir binanın dış cephesi Al kapalı gözenekli köpük ile kaplanmıştır. Al köpük yapısının ayrıntılı bir görünümü Resim 2.10'da verilmiştir [82].



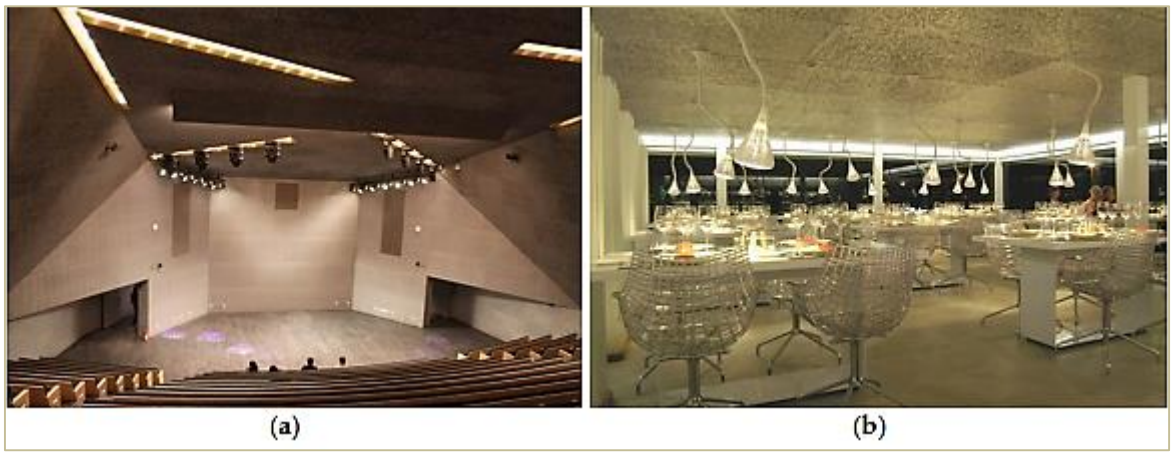
Resim 2.10. Kapalı gözenekli Al köpük ile kaplı bina ve köpük yapı görünüşü [82]

2015 yılında İsviçre'de yüksek irtifada yer alan ve ek işlevsellik sunan bir kır evini yüksek sıcaklık değişimleri ve güçlü hava akımların nedeniyle cepheyi bozulmadan korumak için kapalı gözenekli köpük ile kaplanmıştır (Resim 2.11). Fayansların yüzeyi kapalı gözenekli panelinin levha yüzeyi eriterek elde edilmiştir.



Resim 2.11. (a) Al kaplamalı kır evi ve (b) cephe karolarının detaylı görünüşü [82]

Kore'de üretilen kapalı gözenekli Al köpükler yanıcı olmayan, akustik yutucular olarak konser salonlarına, konferans salonlarına, oditoryumlara, spor merkezlerinin taban ve tavanlarına uygulanmıştır. Oditoryumlarda veya geniş odalarda tavanlar, ses kontrolü için delikli saclar çok sık kullanılmaktadır. Bu geleneksel yapı malzemesine alternatif olarak, ses yutumu için açık gözenekli veya ikincil işlem yapılmış kapalı gözeneli metalik köpük panellerin uygulamaları, farklı şirketler tarafından uygulanılmaya başlamıştır. Köpük yüzeyinden, köpük iç kısmına yönlendirilen ses dalgaları, gözenekli yapıda birkaç yansımadan sonra yakalanırlar ve sönümlenirler. Gözenek büyüklüğü, dağılımı ve farklı yönelimler geniş bir frekans spektrumu üzerinde çok etkili bir sönümleme sağlar. Resim 2.12'de ses kontrolü için kapalı gözenekli Al köpük ile kaplı seyir salonu tavanı ve bir restoran tavanını görüllmektedir.



Resim 2.12. Al köpük ile kaplı: (a) seyir salonunun tavanı ve (b) restoran tavanını [82]

Susturucu olarak kullanımı

Ses basınç çarpmaları ve mekanik titreşimleri sönümleme parçaları genel endüstriyel uygulamalardır. Farklı yapı ve gözenek değerlerindeki malzemeler birleştirilerek seçilen bazı frekansların ses dalgasının geçebildiği, diğer frekanslarda geçemediği malzemeler üretilebilir. Kompresör ve pnömatik aletlerde oluşan ani basınç değişimleri gözenekli sinterlenmiş malzemelerle sönümlenebilir [80].

Alev tutucu olarak kullanımı

Gözenek duvarı malzemesi olarak kullanılan yüksek iletkenliğe sahip gözenekli metaller, yanıcı gazların alev yayılmasını durdurmak için kullanılabilir. Bazı açık gözenekli metalik köpük çeşitleri 550 m/s hızla ilerleyen alevleri yakalama yeteneğine sahiptir [98].

Gemi inşa endüstrisinde kullanımı

Hafif ağırlıklı malzemeler gemi inşa sektöründe önemli bir yere sahiptir. Modern yolcu gemileri bütünüyle alüminyum ekstrüzyon, alüminyum levha ve alüminyum bal peteği yapılarından oluşmaktadır. Alüminyum köpük yapılı sandviç paneller bu uygulamalarda yer bulmuştur. Bu yapıların yüzey tabakaları, çekirdek malzemesi oldukça elastik olan poliüretan yapıştırıcılarla bağlanırsa, çok iyi sönüm davranışlı hafif ve sağlam bir yapı elde edilir. Metal köpükler gemilerde ambar platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve fişek ambarları gibi alanlarda uygulamaları bulunmaktadır [98]. Ayrıca gemi endüstrisinde, örneğin, makine dairesinden gelen gürültünün önlenmesi, yanma egzoz borusu ve hava temizleme sisteminin kabinler arasındaki köpüklü iç duvarlar Al köpük tarafından sağlandığı başka uygulamalar da bulunmaktadır.

Filtre olarak kullanımı

Katı parçacıkları, gaz veya sıvıdan veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için büyük depo hacmi nedeniyle açık gözenekli alüminyum köpük metaller kullanılmaktadır. Açık gözenekli metal köpükler yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanımı nedeniyle, dizel partikül filtreleri, kimya endüstrisinde yüksek sıcaklık filtreleri, selektif kataliz indirgemesi vb. olarak uygulanmıştır (Resim 2.13).



Resim 2.13. Fonksiyonel uygulamalar için farklı filtre tipleri [82]

Isı değiştirici olarak kullanımı

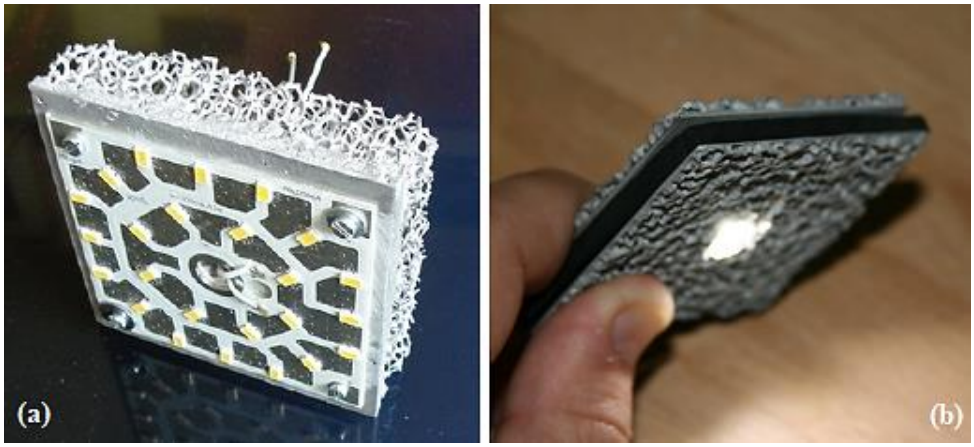
Medikal lazer uygulamaları için elektron tarama mikroskoplarının lenslerini veya ısıl enerji emicilerini ısıl stabilizasyonu için farklı cihazlar, örneğin küçük ısı değiştiriciler imal edilmiştir. Isı değiştiricilerin özel bir uygulaması, bilgisayarların ve mobil elektronik cihazların hızla büyüyen performansından dolayı, çok etkili ısı alıcıları talebin günden güne arttığı bir alan olan pasif ısıl soğutmadır.

Korozyon direnci ve yüksek ısıl iletkenlik özelliklerinden dolayı açık gözenekli alüminyum ve bakır esası köpük metaller ısı değiştirici olarak kullanılabilirler. Kapalı gözenekli köpük metaller ise düşük ısıl iletkenliklerinden dolayı ısıl kalkan olarak kullanılırlar. Ayrıca geniş metal sünger alanı çok etkili pasif soğutma sağlar. Bu uygulamaya örnek olarak, yekpare soğutma radyatörleri ve bilgisayar çipleri ile güç elektroniği için mikro elektronik cihazlar verilebilir. Resim 2.14'de farklı ısı değiştiricilerin filtresi görülmektedir.



Resim 2.14. Al ve Cu esaslı açık gözenekli köpükten üretilmiş ısı değiştiriciler [82]

Günümüzde standart ampuller modern, güçlü LED lambalarla değiştirilmektedir. Resim 2.15'de görüldüğü gibi Berlin Teknik Üniversitesinde üretilen çipler açık gözenekli ve kapalı gözenekli köpük metal sandviç yapının üzerinde bulunan iki plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Basınçla devir daim edilen soğuk hava çipler'i pasif ısıl soğutma sağlamaktadır.



Resim 2.15. Led lambalar: (a) açık gözenekli köpük ve b) kapalı gözenekli Al sandviç köpük kesit görünüşü [82]

Güneş santrali uygulamalarında kullanımı

Güneş ısıl enerjisi, ısı üretimi ve sonuç olarak elektrik üretimi için güneş enerjisinden yararlanma teknolojisidir. Polimer içermediği için kapalı gözenekli alüminyum sandviç köpükler uygun bir malzemedir. Polimerlerden farklı olarak, gündüz ve gece saatlerinde +

60 ℃'den 0 ℃'ye kadar olan büyük sıcaklık farkları nedeniyle oluşabilecek yüzey bozulmaları alüminyum sandviç köpük (ASK)'yı etkilemeyecek ve uzun ömür garantilenecektir.

Resim 2.16'da Kaliforniya'daki Mojave çölünde parabolik oluklu güneş kollektörleri ve muhtemel bir ayna düzenlemesini gösteren güneş termik santrali görülmektedir. Kollektörlerde 1500 mm uzunluğunda ASK'dan yapılmış bir parabolik ayna taban plakası bulunmaktadır [105].



Resim 2.16. Güneş ısıl enerji üretiminde alüminyum sandviç köpüklerin kullanımı [105]

Yemek pişirmede kullanımı

Metalik köpükler yüksek erime sıcaklığı ve ısıl iletkenliği nedeniyle, ısı ve ateşe dayanıklılığın istendiği uygulamalar için kullanılabilirler. Kapalı gözenekli alüminyum sandviç köpük paneller barbekü ve pişirme plakaları olarak kullnılması için sıcak şekillendirme ile üretilmiş ve seramik bir plazma tabakası ile kaplanmıştır. Böylece uygun homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. ASK'nın bir tarafına yöneltilen nokta benzeri bir ısı kaynağı, örn. bir gaz alevi, ilk önce yüzey tabakasını ısıtır. Yoğun yüz tabakasının ısı iletkenliği, köpüğünkinden 30 kat daha yüksek olduğu için, ısı ilk olarak tabaka boyunca yayılacaktır. ASK bu nedenle verimli ısı dağıtıcısıdır. Ayrıca plakanın toplam ısıl kapasitesi düşüktür, yani levhada çok az ısı depolanmaktadır. Bu durum ASK'nın kızartma tavaları veya tencere gibi mutfak aletleri için bir malzeme olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Resim 2.17a, şekillendirilmiş bir ASK plakasından oluşan bir barbekü plakasını göstermektedir. Levhanın kenarları sıcak şekillendirme tekniği ile kapatılmış ve levha yüzeylerine yapışmayı önlemek için bir plazma kaplama uygulanmıştır. Resim 2.17b, kırsal ortamlarda kullanılan seramik plakalı bir ASK pişirme ocağını göstermektedir. Bu ocaklar genellikle odun ateşiyle ısıtılır. Çok iyi ısı yayılımı, ısı iletim özellikleri ve ASK'nın düşük ısıl kütlesi nedeniyle, geleneksel seramik levhaya kıyasla % 50 enerji tasarrufu sağlanabilir ve ısıtma süresi 2 dakikaya düşürülebilir. Üstelik hiçbir çatlama görünmeyebilir. UNESCO, Alman Teknik İşbirliği ile Etiyopya'da prototipleri test edilen pişirme ocakları için 175.000 parça üretim planlaması yapılmıştır [105].



Resim 2.17. (a) ASK yüzey kaplamalı barbekü plakası, (b) odun ateşi fırını için basit pişirme plakası [105]

Nükleer enerji uygulamalarında kullanımı

Nükleer güç sistemlerinin güvenli ve ekonomik çalışması, inşaat malzemelerinin başarılı performansına büyük ölçüde bağlıdır. 60 yıl kadar kullanım süresi olan bir nükleer enerji santralinin ömrü boyunca malzemeler strese, titreşime, sıcaklık değişimlerine ve yoğun bir radyasyon alanına maruz kalmaktadır [106].

Nükleer reaktörlerde imalat ve montaj özelliklerinin yanı sıra uygun ısıl özellikler ile birlikte enerji ve ısıl şok direnci ve uzun vadeli stabilite gibi iyi mekanik özelliklere sahip gelişmiş fonksiyonel malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, bu tür malzemeler yüksek enerjili ve yoğun bir radyasyon alanında kullanıldıklarından radyoaktif etkilere karşı dirençli olmalıdır. Metalik köpük malzemeler, artan güvenlik gereksinimleri, tasarım esnekliği ve nispeten uygun maliyeti ile reaktör performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Yapılan araştırmalar, hafif kompozit Al köpüklerin X-ışınlarını, gama ışınlarını ve

nötron radyasyonunu bloke etmede etkili olduğunu ve yüksek çarpışma enerjisini emebildiğini göstermiştir [106].

Saf kurşun ile kıyaslandığında açık ve kapalı gözenekli Al köpükler çevre dostu, ısı yalıtımı ve enerji emilimi özellikleri ile birlikte ayırt edici mekanik, ısıl, elektriksel ve akustik özellikleri nedeniyle nükleer güvenlik, uzay araştırmaları ve medikal teknoloji uygulamalarında kullanımına yönelik yapılan çalışmalar devam etmektedir [49].

Metal esaslı köpük malzemelerin üretim maliyetinin yüksek olması nedeniyle çalışmalar bu alanda yoğunlaşmaktadır. Farklı üretim metotları ve katkı maddeleri kullanılarak üretim maliyetleri düşürülmeye çalışılmaktadır. Endüstriyel kullanım alanları genişledikçe, daha fazla üretici tarafından kapalı ve açık gözenekli metalik köpükler üretilmektedir. Yapılan çalışmalar metal esaslı köpük malzemelerin yakın zamanda güncel hayatımızda oldukça fazla yer alacağını göstermektedir.

2.5. Al köpüklerin Isıl ve Akustik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmalar

Literatürde metalik köpüklerin üretim, mekanik, ısıl ve akustik özelliklerinin araştırılmasına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu bölüm içerisinde çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulan malzemeler olarak Al esaslı metalik köpüklerin ısıl ve akustik özellikleri ile ilgili yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

Amjad (2001), belirli gözeneklilik oranına sahip Al köpüklerin ısı iletim katsayısı ve gürültü azaltımının modellenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Gözenek şekil ve boyutunun ısı iletim katsayısını etkileyip etkilemeyeceğini görmek için bir küp ve küre modeli geliştirmiştir. Küp model ile ısı iletim katsayısı gözenekliliğin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Küre model ile şeklin ısıl iletim katsayısını nasıl etkilediğini belirlenmesi amaçlanmıştır. Ses yutumunu ölçmek için kullanılan modeller özetlemiştir. Küp model ısı iletim katsayısının herhangi bir gözeneklilik seviyesi için tahmin edilebileceğini göstermiştir. Küp gözenek boyutunun düşük gözenekli yapıda ısıl iletim katsayısı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Küre modeli şekil etkisinin ısı iletim katsayısı üzerinde çok fazla etkili olmadığını göstermiştir. Kürelerdeki gaz basıncının ısı iletim katsayısın üzerindeki etkisi de araştırılmıştır ancak basıncın ısı iletim katsayısın bağımsız olduğunu göstermiştir. Çalışmada, küre gözenek boyutunun ısı iletim katsayısı üzerinde

herhangi bir etkisinin olmadığını doğrulanmıştır. Ayrıca ses yutumunun frekansın bir fonksiyonu olarak incelenmesi için bir model uygulanmıştır [107].

Akseli (2005), toz tabletlerden köpükleştirme yöntemi ile SiC-parçacık (SiCp) katkılı kapalı gözenekli alüminyum (Al) ve saf alüminyumdan elde edilen köpüklerin etkin ısı iletim katsayıları (EIK) ve ses yutum katsayılarını belirlemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Diğer çalışmalarda elde edilen teorik formüller kullanılarak efektif ısı iletim katsayıları hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Köpükler üzerinde belirli ölçülerde delik delmenin ses yutum katsayısına etkisi incelenmiştir. SiC-parçacıklarının takviyesi ile kapalı gözenekli alüminyum köpüğün efektif ısı iletim katsayısında düşüş görülmüştür. Bağıl yoğunlukları düşük olan SiC-parçacık takviyeli alüminyum ve saf alüminyum köpüklerin düşük frekanslarda benzer ses yutum katsayılarına sahip oldukları gözlenmiştir. Ancak yüksek frekanslarda SiC-parçacık takviyeli alüminyum köpüğün ses yutum katsayısının yükseldiği görülmüştür. 400 Hz üstündeki frekanslarda delik delme işleminin etkin olduğu, numunelerin yükselen ses yutum katsayıları ile belirlenmiştir. Al ve SiC/Al'nin ses yutum katsayılarının delik delme yoluyla önemli ölçüde arttırılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca SiC/Al köpüklerin ETC değerleri saf Al köpüklere göre daha düşük bulunmuştur [51].

Ravindran (2007), uçak gürültü kontrol uygulamalarında kullanılan malzemeler için, ters akustik karaterizasyon tekniğine dayalı gözenekli malzemelerin tahmini geometrik özelliklerinin doğruluğunu içeren alternatif bir yöntem araştırmıştır. Gözenekli malzemenin akustik etkilerini içeren ve aynı zamanda ters karakterizasyon tekniği için ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçüm verilerinin girdisini kullanan yeni bir doğrulama döngüsü tasarım aracı oluşturmuştur. Bu teknikte Foam-X ve Comet TrimTM gibi yazılım kodlarında veri girişi olarak empedans tüplerinde ses yutum katsayısı ve ses iletim kayıplarının ölçüm sonuçlarını kullanmıştır. Bu tasarım aracı dik gelen ses dalgasına ait yutum katsayısı ve iletim kaybını tahmini olarak hesaplamıştır. Hem köpükler hem de lifler için her iki doğrulama döngüsü kullanılarak ölçülen ve tahmin edilen yutum katsayıları arasında iyi bir uyum gözlemlemiştir. Çalışmada ses iletim kaybında, köpükler için iyi uyum gözlenirken lifler için iyi bir uyum gözlemlenememiştir. Ayrıca numune yaşlanmasının veya ölçüm tüpü yerleştirme sınır koşullarındaki değişikliğin olası etkileri ters karakterizasyon tekniklerinin araştırılması sürecinde keşfedildiği belirtilmiştir [37].

Hong ve diğerleri (2015), Lattice Monte Carlo (LMC) yöntemini kullanarak, 0.828 ile 0.894 arasında gözeneklilik oranına sahip birkaç kapalı gözenekli alüminyum köpüğün EIK'sını tahmin etmek için bir kübik birim model uygulamışlardır. Nümerik sonuçlar, kararlı durum karşılaştırmalı yöntem ile elde edilen EIK'lar ile karşılaştırılmıştır. Gerçek gözenek duvarının ısı iletim katsayısı (CWTC), alüminyum köpüklerin yüzey sınırları karakterize edilerek geliştirmek için uygulanmıştır. Sayısal sonuçlar, gözenek duvarının ısı iletim katsayısı (CWTC) saf alüminyumunkine ayarlandığında bağıl yoğunluk ile doğrusal bir bağlantı göstermiştir. Öte yandan, kübik birim modeli, Image-Pro yazılımı ile karakterize edilen yüzey sınırlarını dikkate alarak geliştirilmiştir. Düzeltilmiş CWTC ve iyileştirilmiş kübik birim modeli ile sayısal sonuçlar ölçülen sonuçlarla iyi uyum göstermiştir. Dolayısıyla LMC yöntemi, kübik birim modeldeki bağıl yoğunluk, CWTC ve yüzey sınırlarının dikkate alınması koşuluyla kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin EIK'sını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceği belirtilmiştir [53].

Perrot ve diğerleri (2013), metalik köpüklerin ses yutum spektrumunun arttırılması veya uyarlanması ihtiyacına ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Bununla birlikte ses yutucu malzeme performanslarını karakterize etmek ve tahmin etmek için gözenekli ortamın makroskopik ve mikroskobik optimizasyon parametreleri değerlendirilmiştir. Bir metal köpüğün mikro-yapısal morfolojisinin (örneğin, açıklık boyutu, gözenek boyutu, bağ çapı, bağ şekli, vb.) akustik performansı üzerindeki etkisi ve köpüğün yapısını daha iyi yutucu yapmak için neler yapılabileceği üzerinde durulmuştur. Farklı üç boyutlu metalik köpük numunelerinin akustik özelliklerini tahmin etmek için öncelikle gözenekli ortamın doğru optimizasyonunun gerekliliği ifade edilmiştir. Metalik köpüğün akustik bir yutucu olması için gözenek ağı morfolojisinin: Dağılım mekanizmalarının mümkün olan en büyük hacimde oluşması için birbirine bağlı gözenek ağı ve metalik bir köpüğün bir akustik yutucu olması için yaklaşık [10-1000] mikrometre aralığında bir gözenek boyutu sunması gerektiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, belli bir uygulamada en iyi yapısal akustik performansı elde etmek için metalik köpüğün mikro yapısının değiştirilerek ele alınacak gürültü spektrumuna göre açık veya kapalı gözenekli metalik köpük imalatı işlemi yapılabileceği vurgulanmıştır [108].

Shashikant ve diğerleri (2016), farklı kalınlık ve yoğunluktaki kapalı gözenekli alüminyum köpük A356 farklı alaşımlar ile (Si, SiC, TiH_2) karıştırarak ses yutum özelliklerini incelemişlerdir. İnfiltrasyon işlemi ile üretilen açık gözenekli Al köpükler akış direncinin

düşük olması nedeniyle kapalı gözenekli Al köpüklere kıyasla ses yutumunda belirgin bir gelişme göstermiştir. Bununla birlikte kapalı gözenekli alüminyum köpükler, delik delme, yuvarlama ve sıkıştırma gibi bazı işlemlerden sonra iyi ses yutum kapasitesine sahip olabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ağırlıkça % 0,8 titanyum hidrür içeren % 86-90 arasında gözenekliliğe sahip olarak üretilen köpüğün ses yutum katsayısı, 3150-6300 Hz frekans aralığında 0.6 ile 0.9 arasında tespit edilmiştir. Köpük kalınlığı arttıkça, ses yutum zirvesi düşük frekansta ortaya çıkmış ve numune kalınlığı arttıkça (10-20-30mm) daha düşük frekanslara kaymıştır. Ses yutum kapasitesi aynı zamanda gözenek boyutu ve gözenek açıklığı boyutuna da bağlı olduğu belirlenmiştir. Düşük frekanslarda gözenek boyutu arttıkça ses yutum zirve yüksekliği artmıştır. Düşük frekanslarda, gözenek açıklık boyutu azaldığında (0.26mm, 0.31mmve 0.36mm) ise ses yutum zirve yüksekliği artarak daha düşük frekanslara kaydığı belirtilmiştir [85].

Pilon ve diğerleri (2004), yeni ve daha verimli ses yutucu malzemeler geliştirmek için metal köpüklerin mikro yapı özellikleri ile bunların akustik özellikleri arasında bağlantı kurarak mikroyapısal özelliklerin akustik performansa etkisini incelemişlerdir. Çalışmada metalik köpüklerin gözenek boyutu ve gözenek açıklıkları ile viskoz Λ ve ısıl Λ' karakteristik uzunlukları arasında Johnson-Champoux-Allard modeli kullanılarak bağlantı sağlanmıştır. Böyle bir model mikro yapısal özelliklerin metal köpüklerin akustik performansları üzerindeki etkisinin incelenmesine imkan sağlamıştır. İncelenen açık gözenekli metalik köpüklerde Johnson-Champoux-Allard modelinin ısıl karakteristik uzunluğu Λ' ile ortalama gözenek çapı arasında ve viskoz karakteristik uzunluğu Λ ile ortalama gözenek açıklıkları arasında doğrudan bir bağ bulunduğu tespit edilmiştir. Bu bağlantı Johnson-Champoux-Allard modelinde kullanılarak, köpüğün akustik performansı üzerindeki gözenek çapı ve gözenek açıklıkları etkisini değerlendirmek ve optimum mikroyapıyı tanımlamanın mümkün olduğu belirlenmiştir. Böylece mikroyapı optimizasyonu ile istenen frekans ve uygulama alanında belirli akustik performansları elde etmenin mümkün olabileceği belirtilmiştir [109].

Yang ve diğerleri (2013), bal peteği yapılı ve kapalı gözenekli köpüklere uygulanabilen iki/üç boyutlu kapalı gözenekli, iki fazlı gözenekli ortamın EIK'sı için tam analitik bir model sunmuşlardır. Laplace ısı iletimi eşitliğine dayanan mevcut bir analitik ifadeyi, dairesel olmayan (veya küresel olmayan) gözenek içeriklerinden kaynaklanan sapmayı düzelten bir analitik şekil faktörü ile birleştirilmiştir. Sonuçlar, kapalı gözenekli ortamın

EIK'sını analitik olarak tahmin edebilen mevcut modelin geçerliliğini göstermiştir. Özellikle normal poligonal gözenekli ortam için düzenli-çokgen gözenekler içeren iki boyutlu petekler ve düzenli-polihedral gözenekler ile üç boyutlu kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin ısı iletim katsayısı analitik olarak tahmin edilmiştir. Geliştirilen model, EIK'nın gözeneklerin şekline ne kadar bağlı olduğunun fiziksel mekanizmalarını gösterdiği belirtilmiştir [110].

Zhu ve diğerleri (2014), yaptıkları çalışmada kapalı gözenekli alüminyum köpüğün Matlab görüntü işleme ve bilgisayarlı tomografi (CT) verilerine dayanan geometrik modelinin yeniden yapılandırılması için yeni bir üç boyutlu rekonstrüksiyon yöntemi önermiş ve Abaqus programında sonlu elemanlar yöntemi ile köpüğün ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları, yeniden yapılandırma geometrisi modeline dayanan Paralel-Seri Model ile iyi bir uyum içindedir. Paralel- Seri Model farklı gözeneklilik derecesindeki kapalı gözenekli alüminyum köpüğün ısı iletim katsayısını daha iyi hesapladığı belirtilmiştir. Yeniden yapılandırılmış geometri yönteminin, gözenek boyutunun alüminyum köpüğün ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca kapalı gözenekli köpüğün ısı iletim katsayısının hem gözenekliliğe hem de gözeneklerin boyutlarına bağlı olduğu vurgulanmıştır [52].

Solórzano ve diğerleri (2008), toz metalurjisi yöntemi (TM) ile üretilen gözenek oranları %50 ile % 80 arasında olan AlSi7 köpüklerin ısı iletim katsayısı, zamana bağlı düzlem kaynak tekniği (TPS) kullanılarak belirlenmiştir. Bilgisayarlı tomografi (CT) tekniği ile yoğunluk dağılımını incelemek için köpük bloklarının farklı yüzeyleri üzerinde çeşitli ölçümler yapılmıştır. Elde edilen değerler, TPS tekniğinin ile ölçülen EIK değerlerinin yoğunluk ve deneylerin yapıldığı köpük bölgesi homojenliğine duyarlı olduğunu göstermiştir. Çalışmada ısı iletim katsayısının hesaplanması için kullanılan çeşitli teorik modeller basitleştirilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Seri-Paralel, Paralel-Seri ve Maxwell tipi teorik modeller ile elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum göstermemiştir. Bu durumun metal köpüğün gözenek yapısındaki kusurlardan kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Son olarak, sadece ayarlanabilir deney parametresi olan modeller ve Bruggemann modeli, deneysel olarak ölçülen ısı iletim katsayısı değerleri ile uyum gösterdiği tespit edilmiştir [111].

Badida ve diğerleri (2015), alüminyum köpüklerin, ses yutum katsayısının ve ses iletim kaybının ölçülmesi için bir metodoloji sunmuşlardır. Alüminyum köpüğün akustik özelliklerinin, aynı kalınlıktaki akustik malzemeye sahip diğer benzer malzemelerle karşılaştırılmasıyla, ses yutum katsayısı değerlerinin 400 Hz'ye kadar olan düşük frekanslar için diğer malzemelerle kıyaslandığında çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. 630-1250 Hz frekans bandında, alüminyum köpük örneklerinin ses yutum katsayısı, diğer akustik malzemelere kıyasla çok benzer değerler veya daha iyi değerler aldığı belirtilmiştir. Alüminyum köpük örneklerinin ses iletim kaybı, diğer akustik malzemelerin değerlerine çok benzerdir. Alüminyum köpüğün kullanımının ana avantajı zor şartlara (nem, sıcaklık, zaralı kimyasal ve titreşim) sahip çevreye uygulanmasıdır. Alüminyum köpük bu ortama uygundur ve aynı zamanda akustik özelliklerini de korur. Alüminyum köpük yol ve bina inşaatı için hafif destekli paneller, otellerde, alışveriş merkezlerinde ve diğer kamu alanlarında ısı ve ses yalıtımı etkisiyle, çevreye zararlı olmayan, çok çeşitli uygulamalara sahip yeni bir malzeme olduğu belirtilmiştir [112].

Byakova ve diğerleri (2014), ses yutum katsayısının geliştirilmesi için yaygın olarak kullanılan Al köpüklerin üretim mekanizması için katılaşma sıcaklığının altına ısıtmayı takiben soğutma işlemini içeren alternatif bir nihai ısıl işlem prosedürü önerilmiştir. AlZnMg alaşımlı metalik köpük, yukarıdaki yöntemi gerçekleştirmek için Alporas benzeri eritme işlemi ile üretilmiştir. Yüksek ses yutum kabiliyetinin sağlanması için gerekli olan kapalı gözenek yapısının açılması, komşu gözenekler arasındaki duvarların çatlatılmasıyla elde edilir ve bu da köpük yapıyı gaz geçirgen hale getirmiştir. Kapalı gözenek yapısının mikrometrik çatlakları ile açılması nedeniyle Al-köpüğün ses yutum kabiliyeti artmıştır. Çatlakların varlığı gözenek yapısının küresel olarak açılıp birbirine bağlı gözeneklerin oluşmasıyla sonuçlanmış ve Helmholtz mikro delikli rezonatörler gibi gözenekler oluşturulmuştur. Ses dalgasının daha fazla yayılması sağlanarak, tüm frekans aralığı boyunca ses yutum katsayısının % 15 arttırıldığı belirtilmiştir [113].

Paek ve diğerleri (2000), yoğunluk ve ısı iletim katsayısı sırasıyla 2,690 kg/m^3 ve 218 W/mK olan 6101 alüminyum alaşımından yapılmış alüminyum esaslı köpük metallerin EIK'sını belirlemek için deneysel bir ölçüm yöntemi kullanmışlardır. Metal köpük d = 0.65, 1.25 ve 2.50 mm'lik gözenek boyutlarına ve 0.89 ila 0.96 arasında gözeneklilik değerlerine sahiptir. Gözeneklilik azaldıkça k_{et}'nin arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte ısı iletim katsayısı sabit bir gözeneklilik'de köpük metalin gözenek büyüklüğünün

değişimimden çok az etkilendiği saptanmamıştır. Isıl geçirgenliğin ise hem gözeneklilik hem de gözenek büyüklüğünden büyük oranda etkilendiği vurgulanmıştır [114].

Lu ve diğerleri (1999), yaptıkları çalışmada ticari olarak Alporas olarak adlandırılan kapalı gözenekli alüminyum köpüğünün ses yutum kapasitesini deneysel olarak incelenmişlerdir. Kapalı gözenekli köpüklerin ses yutum özelliklerinin çok iyi olmadığı ve köpüklerin ses yutum kapasitesinin haddeleme ya da sıkıştırma yöntemi ile arttırılabileceği belirtilmiştir. Bu işlemlerin gözenek yüzeylerini kısmen kırarak, hava partiküllerinin gözenekli yapıya girip çıkamasını sağlayacağı ifade edilmiştir. Çalışmada düşük bağıl yoğunluklara sahip köpükler (~ 0,09) yüksek bağıl yoğunluklara sahip olanlardan daha iyi ses yutucu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca aynı yoğunlukta ve 10 mm kalınlığa sahip Alporas köpükler ile optimum ses yutumu elde edilmiştir. Bununla birlikte, Alporas köpüklerindeki ses yutumu esasen iki dağılım mekanizmasına (viskoz kayıp ve termoelastik sönümlenme) atfedilmiştir. Metal köpüklerin ses yutum kapasitesi sağlamlıkları, mukavemetleri, yangın geciktirmesi, çarpma enerjisi emme kapasitesi ve hava direnci ile birlikte, uçak, otomobil, makine ve binaların gürültü ve titreşim kontrolünde geniş uygulamaları alanları için cazip adaylar olmasını sağladığı vurgulanmıştır [115].

Yu ve diğerleri (2007), farklı yoğunluk ve kalınlıklara sahip 1,24 cm-1,1cm boyutlarında Al-Si kapalı gözenekli alüminyum köpük levhaların ses yalıtım özellikleri farklı frekanslarda (100-4000 Hz) ses azaltma indeksi (R) ölçülerek değerlendirilmiştir. Farklı frekans aralıklarındaki Al-Si köpük levhaların ses azaltma indeksi (R) farklı mekanizmalar tarafından kontrol edildiği ve düşük frekanslardaki ses yalıtım indeksinin (R), yüksek frekanslardaki ses yalıtım indeksinden (R) daha küçük olduğu belirtilmiştir. Farklı kalınlık ve yoğunluklara sahip Al-Si köpük levhalar üzerinde yapılan deneyler malzeme kalınlık ve yoğunluğu eşdeğer arttırıldığında ses azaltma indeksi (R) ve tek sayı ses azaltma indeksindeki (Rw) artma eğiliminin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle kalınlık ve yoğunluğun arttırılmasının malzemenin ses yalıtım özelliğini arttırmaya yönelik sınırlamalara sahip olduğu ifade edilmiştir. Pratik uygulama göz önüne alındığında, yoğunluğu 0.51 g/cm³ ve kalınlığı 20 mm olan Al-Si köpük levhaların tek sayı ses azaltma indeksleri (Rw) sırasıyla 30,8 dB ve 33 dB olup, hafif malzemeler arasında iyi ses yalıtımı özelliği gösterdiği belirlenmiştir [116].

Fan ve diğerleri (2011), gaz enjeksiyon yöntemi ile üretilen kapalı gözenekli alüminyum köpüğün mikro ve makro gözenek yapısını optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gözlemlemiş ve akustik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Gaz enjeksiyon yöntemi ile üretilen alüminyum köpük, kapalı gözeneklere ve ince gözenek duvarlarlı bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir. Gözenek boyutlarının, alüminyum köpüklerin kalınlığının ve köpük numunelerinin arkasına yerleştirilmiş hava boşluklarının köpüklerin ses yutum performansı üzerindeki etkisi ölçülmüştür. Daha büyük gözenek boyutlarına sahip köpüklerin, gözenek duvarı yüzeyindeki kırışmalar daha fazla ses enerjisi tüketimine neden olan çatlaklar ve gözenekleri oluşturduğundan daha fazla ses yutum eğilimi göstermiştir. Ayrıca, ses yutum katsayısı, köpüklerin kalınlığının artmasıyla belirgin bir şekilde değişmemiş. Buna ek olarak köpüklerin arkasında ayarlanabilir boşluk bırakılması, ses yutum verimliliğini kayda değer bir şekilde artırdığı belirtilmiştir [117].

Babcsa´n ve diğerleri(2003), Alporas ticari ismi ile bilinen farklı yoğunluk ve sıcaklık değerlerine sahip kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin ısı ve elektriksel iletim katsayılarını karşılaştırmalı ve girdap akım yöntemi ile araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; numune yoğunluklarının 0,171 g/cm^3 olması durumunda ısı iletim katsayısı değerlerinin önemli oranda etkilemediği belirtilmiştir. Tüm yoğunluklarda sıcaklık (RT-500 ℃ aralığında) ile ısı iletim katsayısında hafif bir artış olduğu, köpüğün ısıl iletim katsayısının yoğunluk değişimi ile hemen hemen lineer davranış gösterdiği belirlenmiştir. Köpüklerin bağıl yoğunlukları ile girdap akım tekniği ile ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri arasında doğrusal bir orantı olduğu, düşük frekanslı girdap akımı ölçüm yönteminin farklı alüminyum köpüklerin elektrik iletkenliğinin hızlı belirlenmesi için yararlı ve uygun maliyetli bir araç olabileceği, köpüklerin ısı ve elektriksel iletim katsayılarının köpüklerin bağıl yoğunluğunun artmasıyla arttığını belirlemişlerdir [118].

Lu ve diğerleri (2014), kapalı gözenekli alüminyum köpüğün ısıl özelliği sayısal olarak çalışılmış ve dairesel gözenek dağılımının ısıl özellik üzerindeki etkileri teorik olarak incelenmiştir. Taşınım ve ışınım göz ardı edildiğinde, gözeneklilik, gözenek büyüklüğü ve gözenek dağılımının ısı iletim katsayısı üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemleri kullanarak araştırılmıştır. Ayrıca birim gözeneğe dolan havanın ısıl taşınım karakteri üzerindeki etkileri de tartışılmıştır. Simülasyon sonuçları, gözenekliliğin artması ile ısı iletim katsayısının doğrusal olarak arttığını, fakat gözenek boyutu değişmediğinde gözenekliliğin artması ile doğrusal bir azalma göstermiştir. Çalışmada gözenek boyutu ve

gözeneklerin dağılımının ısı iletim katsayısı üzerinde önemsiz etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte küçük boyutlu gözenek esas alındığında havanın ısı iletim katsayısı alüminyumun köpük ısıl taşınım özelliği üzerinde hafif bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak, düşük sıcaklık altında kapalı gözenekli alüminyum köpük malzemelerin ısı iletim katsayısı esas olarak gözeneklilikten etkilendiği vurgulanmıştır [119].

Wang ve diğerleri (2016), alüminyum köpüğün küresel üç boyutlu modeli gözenek duvar kalınlığı, gözeneklilik ve ortalama gözenek boyutu arasındaki bağlantıyı kullanarak C programlama diliyle oluşturulmuştur. Sıcaklık dağılımı Ansys yazılımı ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, ısı iletim katsayısı gözenekliliğin azalmasıyla birlikte artmıştır. Aynı gözenekliliğe sahip olan alüminyum köpük için, farklı gözenek dağılımları farklı ısıl iletim katsayısı değerlerini ortaya çıkarmış; bu da gözenek dağılımının kapalı gözenekli alüminyum köpüğün ısıl iletim katsayısı üzerinde çok fazla etkisi olduğunu göstermiştir. Isı akışına dik doğrultuda uzanan veya dağılan gözenekler, ısı akışının zorlanmasına neden olmuştur. Bu durum, ısıl iletim katsayısını hızlı bir şekilde düşüren yüksek ısıl dirençli bir duvarın ortaya çıkmasından kaynaklanmıştır. Bu nedenle çalışmada gözenekliliğin, kapalı gözenekli alüminyum köpüğün ısıl iletim katsayısı belirleyen tek parametre olmadığını belirtilmiştir [120].

Xiaa ve diğerleri (2017), farklı makro yapılara (delikli ve hava boşluklu) sahip kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin akustik deneyleri empedans tüpü yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Makro yapıların ses yutum katsayısı ve ses azaltma indeksi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Herhangi bir işleme tabi tutulmayan kapalı gözenekli alüminyum köpük, daha düşük ses yutum ve mükemmel ses yalıtımı özelliklerini göstermiştir. Bununla birlikte, tam delik delinmiş kapalı gözenekli alüminyum köpük mükemmel ses yutum davranışı ve zayıf ses yalıtım özellikleri sergilemektedir. Buna ek olarak, yarım delik delinmiş kapalı gözenekli alüminyum köpük, yüksek frekans aralığında (> 2500 Hz) ses yutum ve ses yalıtım özelliklerinin iyi bir kombinasyonunu göstermiştir. Ayrıca, farklı kalınlıklarda hava boşluklarına sahip kapalı gözenekli alüminyum köpükler, hava boşlukları olmayan köpüklere kıyasla düşük frekansta iyi ses yutum davranışları gösterir. Farklı hava boşluğu kalınlıklarına sahip örneklerin ses azaltma indeksleri iyidir ve herhangi bir işlem yapılmayan ve yarı delik delinmiş köpüklere benzerdir. Genel olarak, farklı ortamlar için gürültü azaltma gereksinimlerine göre, farklı makro yapıya sahip köpükler üretilebileceği belirtilmiştir [121].

Chevillotteve diğerleri (2010), kapalı gözenekli metalik köpüklere dellinen deliklerin, akustik olarak köpük mikroyapı ile nasıl etkileşime girdiğini ve köpüğün ses yutumunu nasıl değiştirdiğini araştırmışlardır. Delikli kapalı gözenekli metalik köpüğün basit bir iki boyutlu mikroyapısal modeli oluşturulmuş ve sayısal olarak çözülmüştür. İki boyutlu sonuçların kaba bir üç boyutlu dönüşümü önerilmiştir. Çalışmada, hesaplama yöntemiyle elde edilen sonuçlar, delikli kapalı gözenekli köpüğün delikli bir katıya benzer şekilde hareket ettiğini göstermiştir. Açık gözenekli köpük numunelerinin aksine, delikli kapalı gözenekli metalik köpük numuneler seçici ses yutum spektrumlarını sunmuştur (geniş frekans bantları aksine). Böylece metalik köpük imalatı sırasında ele alınacak gürültü spektrumu bilindiğinde, maksimum ses yutumunu meydana geldiği frekansın avantajlı bir şekilde ayarlanabileceği ifade edilmiştir. Genel ses yutum seviyesi, sabit delik çapına sahip kapalı gözenekli metalik köpüğün gözenek boyutu ile esas itibariyle değişmemiştir. Bununla birlikte yapılan hesaplamalar gözenek boyutunun ses yutumunun seçiciliğini kontrol ettiğini ve büyük gözeneklerin kıvrımlılığı arttırdığını göstermiş, gözenek boyutu arttıkça maksimum ses yutumunun gerçekleştiği frekansın düşük frekanslara kaydığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, ses yalıtımı için metalik köpüklerin kapalı gözenekli olması gerektiği ve ikincil işlemler uygulanarak ses yutum özellikleri için kullanılabileceği vurgulanmıştır [122].

Nosko ve diğerleri (2017), metalik köpüklerin ses yutum yeteneği, köpüğün üretim metoduna, malzeme kompozisyonuna, köpük gözenekliliğine, kalınlığına ve köpük yapısının ses geçirgen hale getirilmesi için çeşitli işlemlere göre tartışmıştır. Hem toz metalurjik yolla hazırlanan köpükler hem de eriyik haliyle üretilen üç farklı alüminyum köpük türleri Access (açık gözenek), Alporas (yarı açık) ve Alulıght (kapalı gözenek) için araştırılmıştır. Metalik köpüklerin ses yutum özelliklerinin ağırlıklı olarak köpük gözenekliliğine, sesin yapı içine girmesine ve başarıyla dağılmasına izin vermeyen sürekli yüzey tabakasının açılmasına, köpük gözenek duvar malzemesinin özelliklerine bağlı olduğu gözlenmiştir. Alulogh alüminyum köpüğünün ses yutum davranışının başarılı bir şekilde iyileştirilmesini sağlamak için çeşitli ilave işlemler gerçekleştirilmiştir. Çeşitli çaplara sahip farklı delikler numuneye delinmiş, geçirgen yapı artışını sağlamak için yüzey cildi çeşitli yöntemlerle uzaklaştırılmıştır. Köpük üzerinde yapılan işlemler neticesinde sabit çaplı delik sayısı arttıkça yapı daha geçirgen hale gelerek ses yutum kabiliyetinde belirgin bir iyileşme sağlandığı belirtilmiştir [104].

Literatür çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde yapılan çalışmalarda farklı yapılar ve bileşenler içeren Al köpüğün ısıl, ses yalıtım veya ses yutum özellikleri tek bir yönüyle ele alınmıştır. Al köpük üzerinde ikincil işlemler yapılarak ve katmanlı yapı konfigirasyonu ile birlikte ısıl özellikleri, ses yutum ve ses yalıtım özellikleri aynı anda araştırılmamıştır. Bu nedenle yapılan çalışmada alüminyum köpüğün ısı ve ses yalıtım malzemesi olarak farklı alanlarda fonksiyonel kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümünde tez çalışmasında kullanılan Al köpüklerin üretim, karakterizasyon makro-mikro yapı analizleri ve test işlemlerinde kullanılan cihazlardan, malzemelerden ve test verilerinin elde ediliş yöntemlerinden bahsedilmiştir.

3.1. Materyal

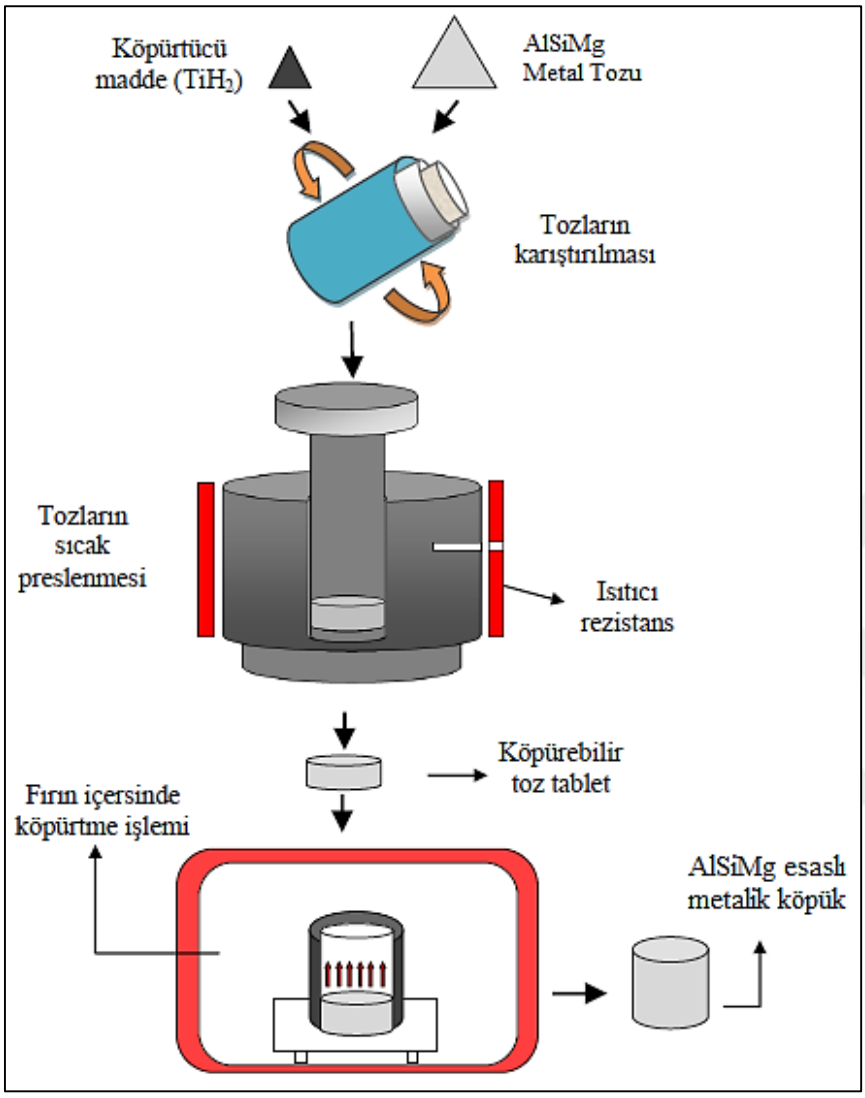
Kapalı gözenekli Alüminyum (Al) köpükler, toz metalurjisi tekniği kullanılarak Gazi Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında üretilmiştir. Al köpüklerin ısıl ve akustik performansının belirlenmesine yönelik test numunelerinin üretimine hazırlık olarak teorik çözümlemeler ve literatürdeki veriler dikkate alınarak malzeme üretim optimizasyonunu yapılmıştır. Optimizasyon verilerine göre en uygun yapısal karakteristiğe (gözenek morfolojisi, gözenek oranı ve malzeme boyutu vb.) ve ısıl ve akustik testlere uygun yüzey geometrisi oluşturacak şekilde Al köpükler üretilmiştir. Bu amaçla nihai deney numunelerinin üretilmesine hazırlık olarak ara ürünler serbest ve kalıp içerisinde köpürtülmüştür. Kalıp içinde köpürtmenin en iyi şekilde gerçekleşmesi için gerekli olan köpürtme sıcaklığı ve süresinin bulunması üzerinde çalışılmıştır. Optimum üretim parametreleri belirlendikten sonra makro ve mikro yapıları incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda köpürebilir malzeme üretimi için matris malzemesi olarak Al, alaşım elementleri olarak Si ve Mg tozları, köpürtücü madde olarak TiH_2 kullanılmıştır. Tozların ayrıntılı fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan metal tozların fiziksel özellikleri

Toz	Temin edildiği yer	Parçacık boyutu (μm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime sıcaklığı (°C)	Saflık (%)
Al	Ecka Granules	<160	2,7	660	99,9
Si	Atlantic Equipment Engineers	<10	2,33	1410	99,9
TiH_2	Sigma-Aldrich	<44	3,91	<400	98,0
Mg	Atlantic Equipment Engineers	<10	1,74	648	99,6

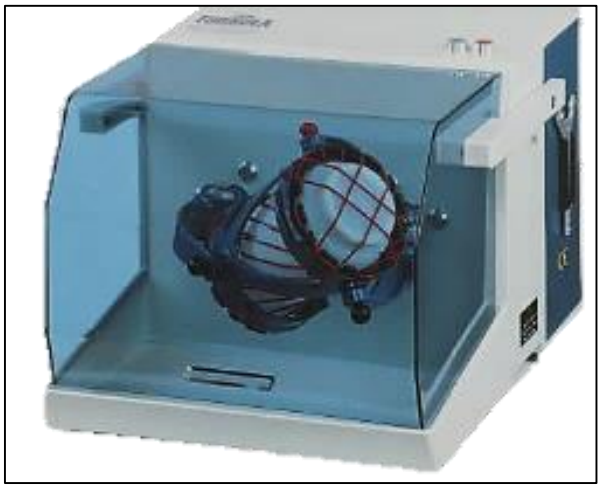
Şekil 3.1'de toz metalurjisi tekniğinde kullanılan sıcak presleme yöntemi ile Al köpük üretimi işlem basamakları görülmektedir.



Şekil 3.1. Sıcak presleme yöntemi ile Al köpük üretimi işlem sırası [86]

3.2. Tozların Karıştırılması

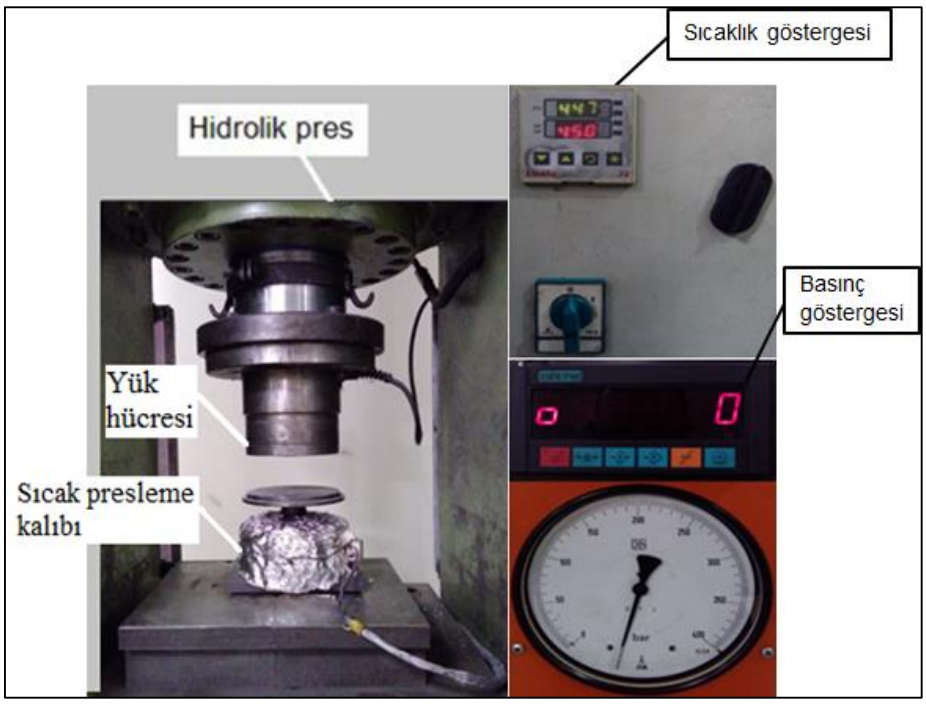
Kompozit köpürebilir malzeme üretimi için Sartorius marka 0,1 mg hassasiyetteki terazi ile ağırlıkça %91,4 Al, %1 oranında TiH_2, %7 oranında Si ve % 0,6 oranında Mg tozları tartılmıştır. Daha sonra tartılan bu tozlar homojen bir karışım oluşturmak için bir kap içerisinde 30 dakika boyunca turbula marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır (Resim 3.1).



Resim 3.1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı

3.3. Presleme İşlemi

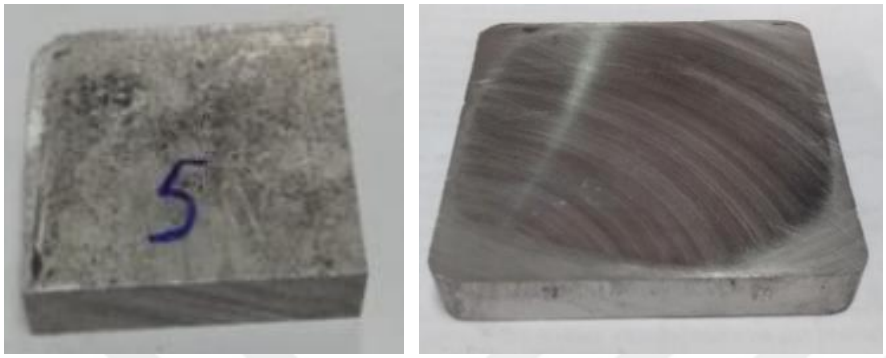
Hazırlanan karışım tozların presleme işlemi (Al+Si+Mg+TiH_2), 280 ton presleme kapasitesine sahip özel yapım hidrolik preste gerçekleştirilmiştir (Resim 3.2). Karışım tozlar önce ~28 MPa basınç altında oda sıcaklığında tek yönlü sıkıştırılmış, daha sonra 450 ºC sıcaklıkta 400 MPa basınç altında 30 dakika süre ile preslenmiştir. İşlem sonucunda 60x60 mm boyutlarında, yüksekliği 10 mm olan köpürebilir kompakt numuneler elde edilmiştir.



Resim 3.2. Hidrolik pres sıcak presleme ünitesi ve ekipmanları

3.4. Preslenen Tozların Köpürtülmesi

Sıcak presleme işlemi sonucunda elde edilen Al esaslı köpürebilir kompakt numuneler ölçüleri 30x30 mm ve 60x60 mm ve yüksekliği 10 mm olarak hazırlanmıştır (Resim 3.3).



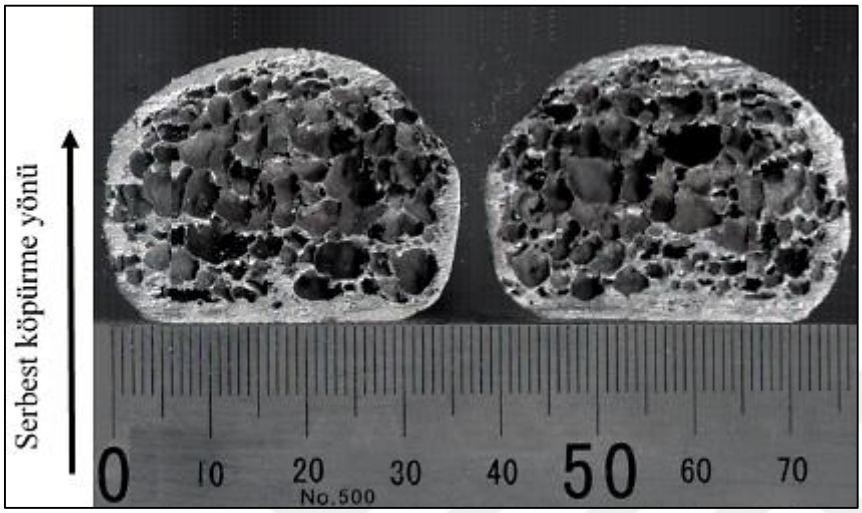
Resim 3.3. Farklı boyutlara üretilen Al ara ürünlerin görüntüleri

Protherm marka 1000 °C kapasiteli fırın içerisinde atmosfer ortamında (koruyucu gaz olmadan) Al matrisin ergime sıcaklığının (~670 °C) üstünde 700, 725 ve 750 °C köpürtme sıcaklıklarında ve 4,6 ve 8 dk köpürtme sürelerinde ayrı ayrı köpürtme işlemine tabi tutulmuştur (Resim 3.4). Fırın içeresinde köpürmesi gözlemlenen numuneler maksimum lineer genleşme seviyesine ulaştığında fırın içeresinden çıkartılmış ve oda sıcaklığına soğutularak köpürtme işlemi tamamlanmıştır.



Resim 3.4. Köpürtme işlemi için tasarlanmış özel fırın düzeneği

Her köpürtme işlemi için en az üç numune kullanılmıştır. Köpürtme işleminde köpürebilir malzemelerin hacimsel genleşme özelliklerini belirlemek için öncelikli olarak serbest köpürtme yapılmıştır (Şekil 3.2). Daha sonra optimum deney parametrelerine göre hazırlanan köpürtme kalıpları kullanılarak köpürtme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Serbest köpürtme ile üretilen Al köpüğün kesit görünüşü

3.5. Üretilen Metalik Köpük Numunelerinin Karakterizasyonu

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen metalik köpük numunelerinin gözenek şekilleri, gözenek boyutu ve gözenek dağılımı incelenmek amacıyla boylamasına kesilmiştir. Numunelerin yoğunluk ölçümü, lineer genleşme özellikleri, gözenek morfolojileri makro ve mikro boyutta belirlenmiştir. Lineer genleşme oranı, hacimsel genleşme oranı, ortalama gözenek boyutu ve gözenek oranının belirlenmesi için aşağıdaki yöntemler kullanılmıştır.

3.5.1. Yoğunluk ölçümü

Üretilen kompozit ön numune ve Al köpüklerin yoğunlukları hem köpürtme öncesi (sıcak presleme sonrası) hem de köpürtme sonrasında Precisa marka XB 220A model hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen Al köpüklerin köpürtme sonrası yoğunlukları Eş. 3.1'de verilen Arşiment prensibine göre ∓ 0,1 mg hassasiyetteki yoğunluk ölçüm kiti ile tespit edilmiştir [76,77].

$$\rho = \frac{m}{V_h - V_s} \tag{3.1}$$

burada; ρ: yoğunluk (g/cm^3), m: ağırlık (g), Vh: havadaki (kuru) ağırlık (g), Vs: su içerisindeki ağırlık (g)'dır.

Üretilen köpürebilir (Al+Si+Mg+TiH_2) kompakt malzemeler ve köpük numunelerin yoğunlukları Eş. 3.2'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_n = \frac{(m_h)}{(m_h - m_{su})}\rho_{su} \tag{3.2}$$

Burada ρ_n; numune yoğunluğu (g/cm^3), ρ_{su}; oda sıcaklığında suyun yoğunluğu (1 g/cm^3), m_h; numunenin havadaki ağırlığı (g) ve m_{su}; numunenin su içerisindeki ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Arşimet prensibine göre ölçülemeyen sabit hacimli büyük boyutlu numunelerinin yoğunlukları ise Eş. 3.3'te verilen formül kullanılarak numunelerin havadaki ağırlıklarının (mh), hacmine (v) oranı ile hesaplanmıştır.

$$\rho_n = \frac{m_h}{v} \tag{3.3}$$

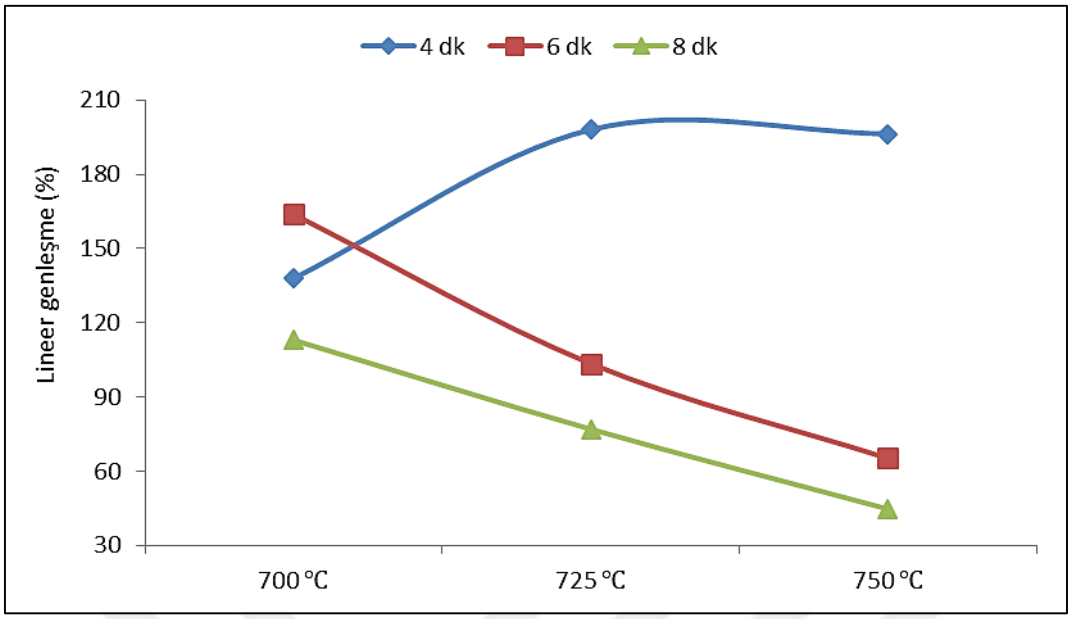
3.5.2. Lineer genleşme oranının belirlenmesi

Al köpüklerin lineer genleşme oranları köpürme sonrası boyutlarındaki değişim ölçülerek hesaplanmıştır. Lineer genleşme oranları Eş. 3.4'de verilen formüle göre hesaplanmıştır [76].

$$LG = \frac{(L_s - L_i)}{(L_i)} \tag{3.4}$$

Burada; LG: Lineer genleşme, Li: Köpürtme öncesi numune yüksekliği (mm), Ls: Köpürtme sonrası numune yüksekliğidir (mm).

Şekil 3.3'de köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer genleşme oranları grafik hâlinde verilmiştir. Bu grafikte 750 ˚C köpürtme sıcaklığında ve 4 dk köpürtme süresinde maksimum lineer genleşme elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı lineer genleşme değişimi

3.5.3. Hacimsel genleşme oranının belirlenmesi

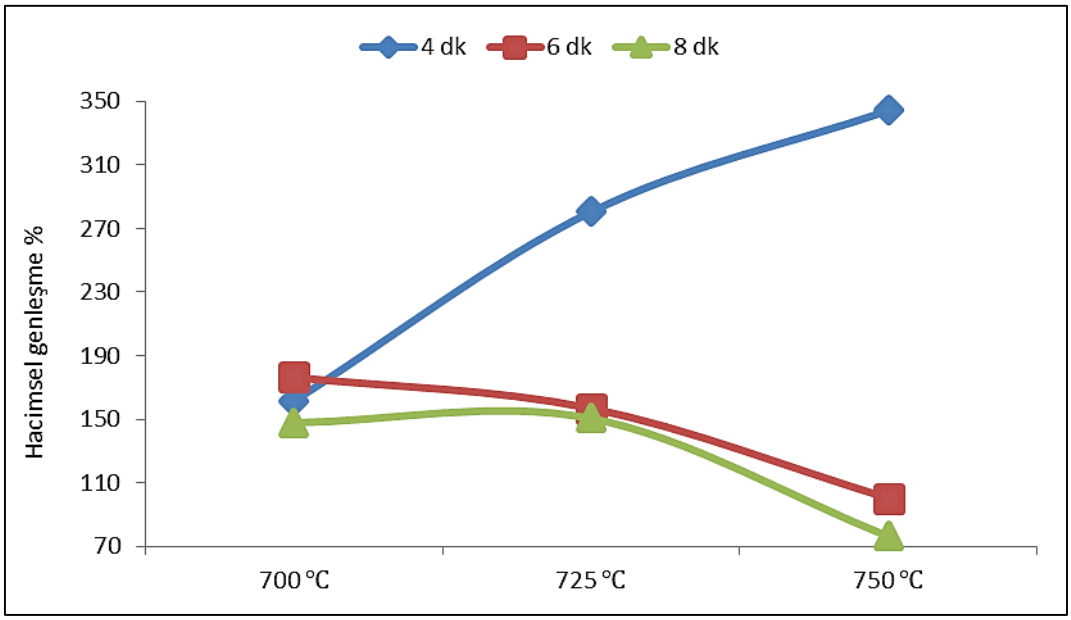
Köpürme sonrası numunelerin genleşme oranları aşağıda verilen Eş. 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

Hacimse genleşme (HG):

$$HG = \frac{m_k/\rho_k}{m_p/\rho_p} - 1 \Rightarrow HG = \frac{v_k}{v_p} - 1 \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte ρ_k; köpük yoğunluğu, v_k; köpük hacmi, m_k köpüğün havadaki ağırlığı, ρ_p; köpürebilir malzeme yoğunluğu, v_p; köpürebilir malzeme hacmi ve m_p; köpürebilir malzemenin havadaki ağırlığıdır.

Al köpüklere ait hacimsel genleşme (%) ve zaman grafiği Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Al köpüğe ait hacimsel genleşme oranı grafiği 4 dk ve 750 °C'de doğrusal bir artış göstererek maksimum hacimsel genleşme yaklaşık % 344 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı hacimsel genleşme oranı değişimi

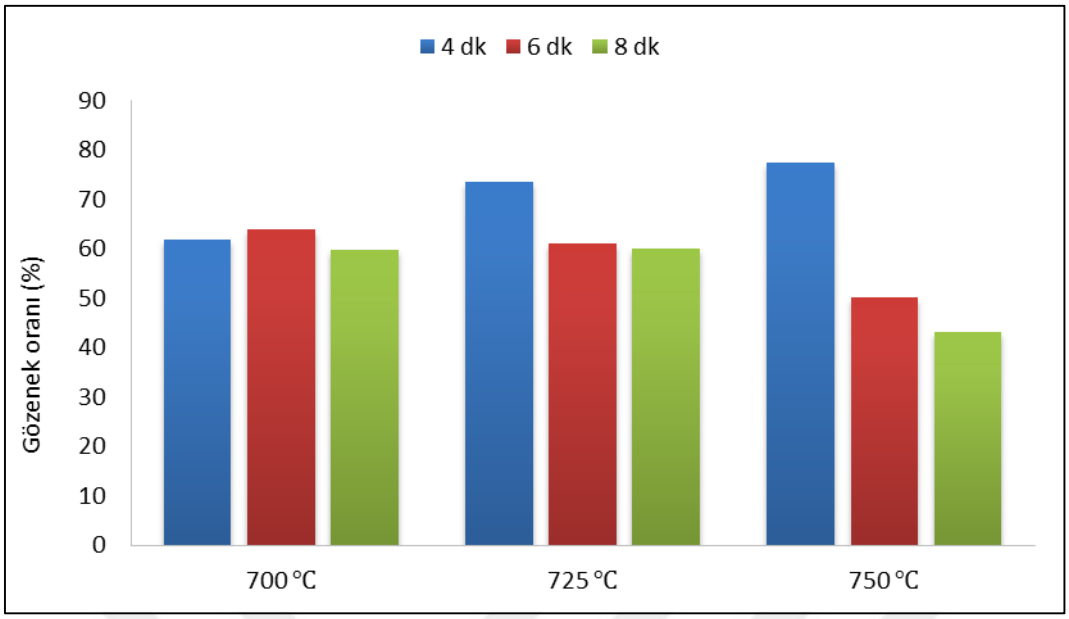
3.5.4. Gözeneklilik oranının belirlenmesi

Köpüğün gözeneklilik oranı Eş.3.6'da verilen denkleme göre hesaplanmıştır [123].

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_p}\right) x\ 100 \tag{3.6}$$

Burada; ϕ: gözeneklilik miktarı, ρ_p ve ρ_k sırasıyla Al matris ve Al köpük malzemenin yoğunluğudur.

Şekil 3.5'de köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözenek oranları değişimi grafik hâlinde verilmiştir.750 ˚C köpürtme sıcaklığında ve 4 dk köpürtme süresinde maksimum gözeneklilik oranı %77 olarak elde edilmiştir.

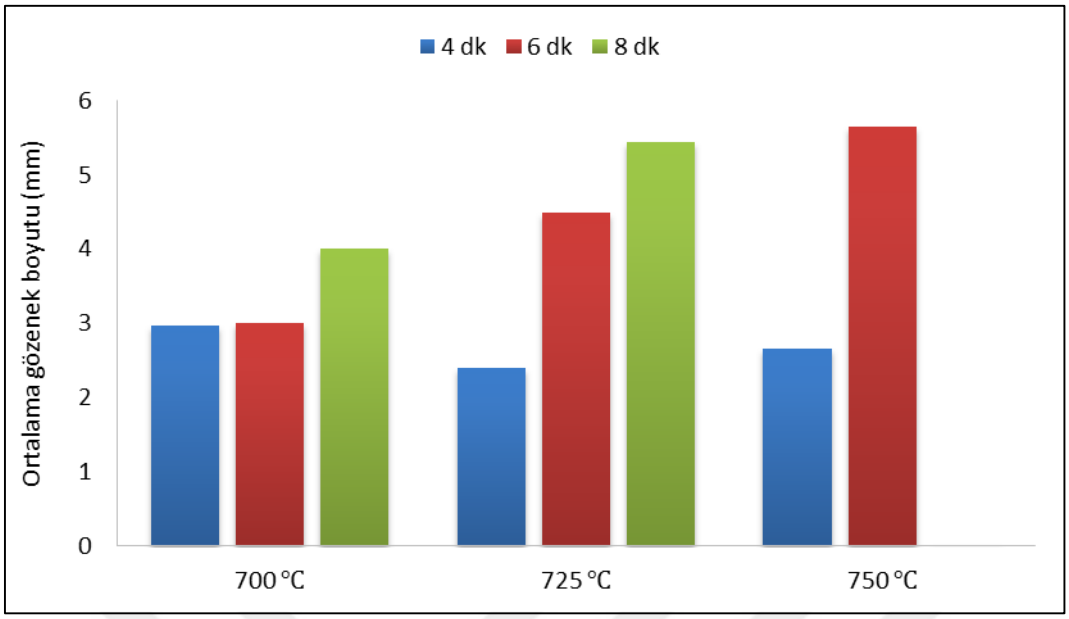


Şekil 3.5. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı gözenek oranları değişimi

3.5.5. Ortalama gözenek boyutu

Ortalama gözenek boyutunu belirlemek için her tip için 3 farklı numune uygun ölçülerde kesitleri alınarak hazırlanmıştır. Al köpük numuneler Leica marka optik mikroskop kullanılarak polarize mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca, gözenek boyutları ölçümü yapılmıştır.

Şekil 3.6'da köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak ortalama gözenek boyutunu değişimi verilmiştir. Köpürtme süresinin ve sıcaklığının artmasıyla birlikte gözeneklilik oranında artış olduğu, ancak 750˚C köpürtme sıcaklığı ve 8 dakika köpürtme süresinde köpük iç yapısında yerçekimi etkisiyle çökmeler oluştuğu ve ölçülebilir gözenek yapısı oluşmadığı gözlemlenmiştir.

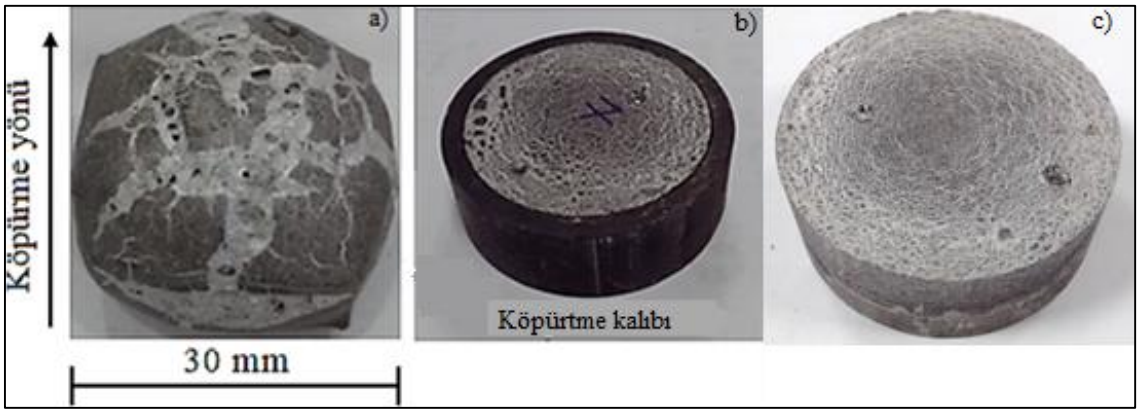


Şekil 3.6. Köpürtme süresi ve sıcaklığına bağlı ortalama gözenek boyutu değişimi

3.6. Kapalı Gözenekli Al Köpüklerin Üretim Parametreleri

Serbest köpürtme işleminde de her köpürtme işlemi için en az üç numune kullanılmıştır. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi değişimlerinin lineer genleşme, hacimsel genleşme, ortalama gözenek boyutu ve gözeneklilik oranı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre 700 ℃ ve 725 ℃ köpürtme sıcaklığı ve 6 ve 8 dk köpürtme sürelerinde köpük içyapısında çökmeler olduğu, homojen dağılımlı gözenek yapısının oluşmadığı, istenen gözenek boyutu ve gözeneklilik oranlarına ulaşılamadığı belirlenmiştir. Serbest köpürtme verilerine göre 750 ℃ fırın sıcaklığında ve 4 dk. köpürtme süresinde optimum gözenek boyutu ve dağılımı elde edilmiştir. Bu sıcaklığın üzerindeki köpürtme işlemlerinde köpük stabilitesinin bozulduğu ve gözenek yapısında çökme oluştuğu görülmüştür.

Serbest köpürtme yöntemi ile üretilen kompakt (kompozit) numunelerinin karakterizasyonu (analizi) yapılarak optimum deney parametrelerine göre hazırlanan köpürtme kalıpları kullanılarak nihai Al esaslı metalik köpük numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir (Resim 3.5 a,b ve c).



Resim 3.5. Serbest (a) ve kalıpta köpürtülmüş (b ve c) Al köpük numuneler

3.7. Kapalı Gözenekli Al Köpüklerin Test Parametreleri

Al esaslı metalik köpüklerin ısı ve ses yalıtım performansı, köpüğün yapım metoduna, malzeme kompozisyonuna, köpük yoğunluğuna, köpük gözenekliliğine, kalınlığına, gözenek morfolojisine, yüzey cildinin kesilip kaldırılarak köpük yapısının ses geçirgen hale getirilmesi gibi çeşitli etmenlere bağlıdır. Bu nedenle ısıl ve akustik performansın belirlenmesine yönelik deney numunelerinin üretimine hazırlık olarak literatürdeki veriler dikkate alınarak malzeme üretim optimizasyonunu yapılmıştır. Optimizasyon verilerine göre en uygun yapısal karakteristiğe (malzeme boyutu, gözenekli yapı, gözenek boyutu ve gözeneklilik değerlerine sahip Al esaslı köpükler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Son olarak test numuneleri tel erezyon kullanılarak boyutlandırılmış ve Al esaslı köpükler üzerinde yapılacak ikincil işlemler için hazırlanmıştır. Metalik köpük numuneler tel erezyon makinesi ile 28 mm, 50 mm ve 100 mm çap boyutlarına getirilmiştir (Resim 3.6). Ses yalıtım ve yutum performansını arttırmak amacıyla, köpük üzerinde farklı tasarımlar yapılmıştır.

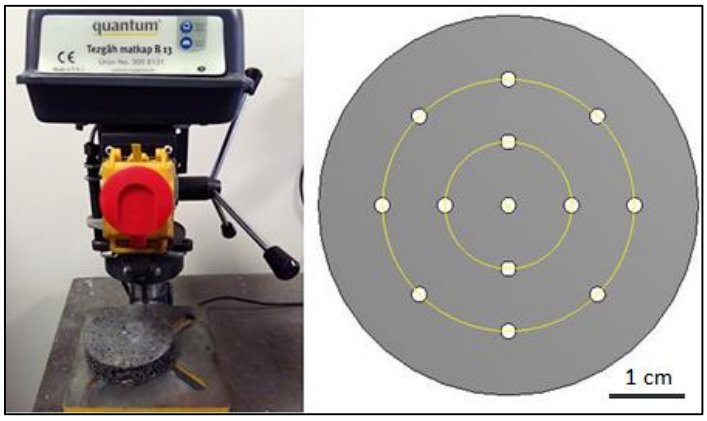


Resim 3.6. Al köpüklerin tel erozyon makinesi ile boyutlandırılması

Kapalı gözenekli Al köpük, sesin yapı içine girmesine ve başarıyla dağılmasını engelleyen sürekli yüzey tabakası ile kaplıdır. Al köpüklerde yüzey cildinin varlığı ses enerjisinin yutum olmaksızın çevre ortama geri dönmesine neden olur. Bu nedenle Al köpüğün ses yalıtımı, ses yutumu ve gürültü kontrolü sağlaması için yüzeyin açılması gereklidir.

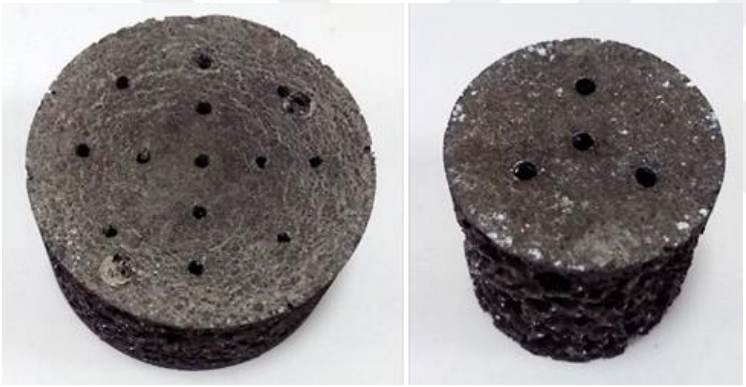
Yapıyı açmak için en kolay yol, yüzey cildinin kesilerek kaldırılması ve boşluk rezonatör mekanizması yoluyla ses yutumunu sağlayan delikleri delmektir. Al köpüğün kapalı gözenek ortamı boyunca delikler açarak iskelet ve doymuş akışkan (hava) arasında bağlantı oluşturup ses dalgasının köpük içerisinde hareketi sağlanmıştır. Ayrıca köpüğün akustik performansını daha geniş bir frekans aralığında maksimuma ulaştırmak için Helmholtz rezonatörünün prensibi kullanılarak köpük plakalar arkasında farklı kombinasyonlarda hava boşluğu bırakılmıştır.

Delik açma işlemi için masa tipi matkap tezgâhı kullanılmıştır. Resim 3.7'de Al köpük numunelere deliklerin açılması için markalama işlemi yapılan köpüklerin şematik diyagramını ve detaylı delinme konumu görülmektedir. Delinme, merkezi olarak numunenin merkezi ile eş merkezli daireler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Delinme oranı % 2 ve delik çapı 2 mm olarak belirlenmiştir. Bu oran bütün delinmiş deliklerin kesit alanının numunenin kesit alanına oranı olarak tanımlanır.



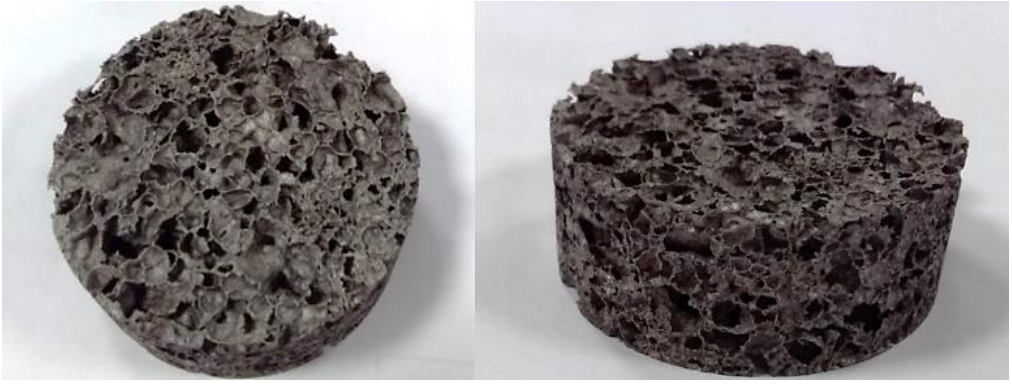
Resim 3.7. Al köpük üzerinde matkap tezgâhında delme işlemi

Resim 3.8’de delik delme işlemi uygulanmış farklı çaplardaki Al köpükler görülmektedir.



Resim 3.8. Farklı boyutlarda delinmiş numunelerin görünüşü

Şekil 3.9’da ısı iletim katsayısı ölçümleri için kullanılan 50 mm çap ve yaklaşık 14 mm kalınlığa sahip yüzey cildi kaldırılmış Al köpük numuler görülmektedir



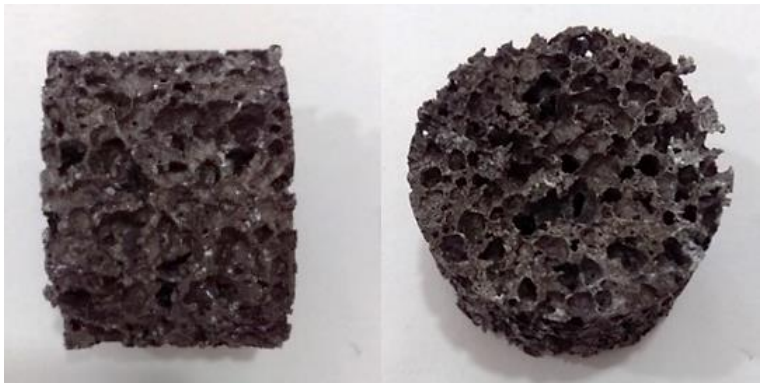
Resim 3.9. Isıl iletim katsayısı ölçümü için kullanılan Al köpük görüntüsü

Şekil 3.10’da ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri için kullanılan 100 mm çap ve 20 mm kalınlığa sahip Al köpük numuler görülmektedir.



Resim 3.10. Akustik performans ölçümü için kullanılan Al köpük görüntüsü

Şekil 3.11’de ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri için kullanılan 28 mm çap ve 20 mm kalınlığa sahip Al köpük numuler görülmektedir.



Resim 3.11. Akustik performans ölçümü için kullanılan Al köpük görüntüsü

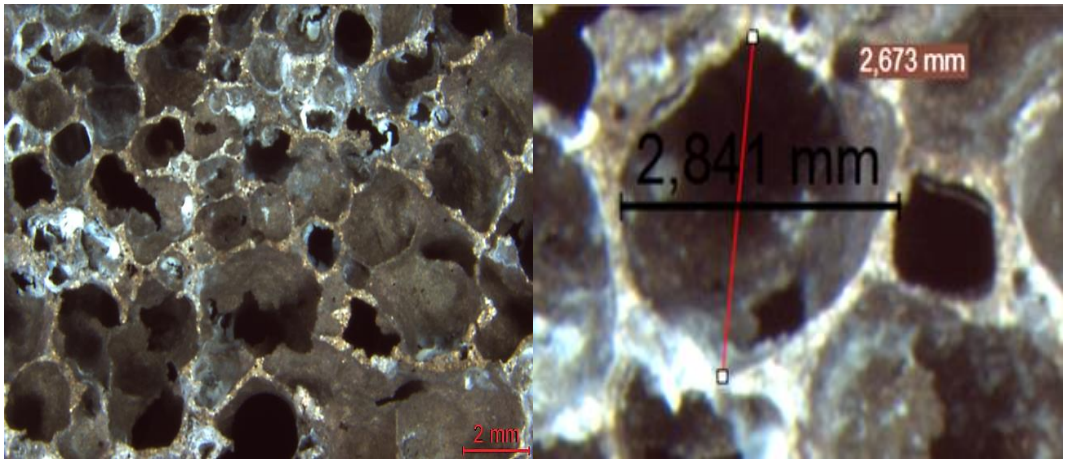
3.8. Kapalı Gözenekli Köpüklerin Makro ve Mikro Yapı Analizleri

Üretilen Al esaslı metalik köpük malzemelere makro yapı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri için köpük numune tel erozyon’da uygun ölçülerde kesilerek hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan numuneler, makro boyutta gözenek şekilleri, gözenek boyutu ve gözeneklilik oranları Leica marka optik mikroskopta 0,6X büyütmede yapılarak belirlenmiştir (Resim 3.12).



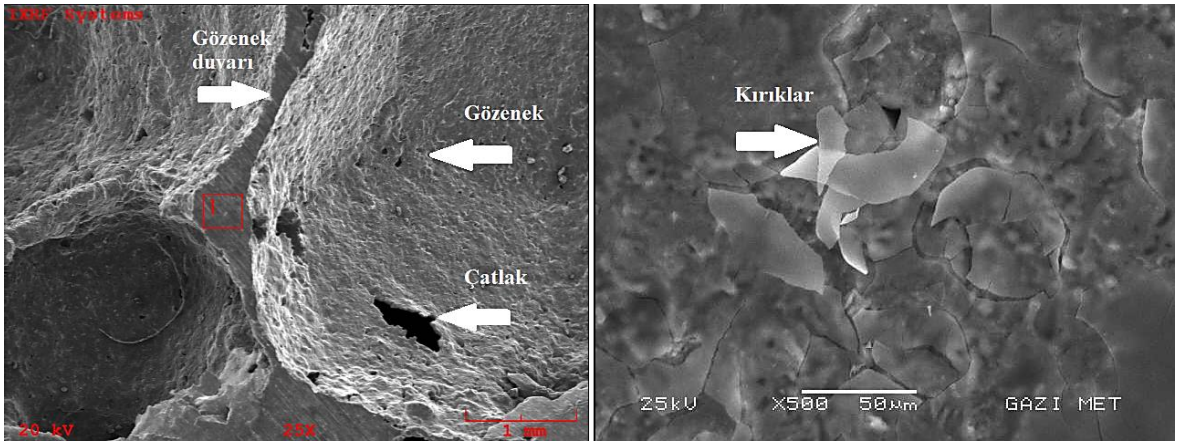
Resim 3.12. Al köpüğün optik mikroskop altında makro yapı analizi

Resim 3.13'de 2 mm çapında delme işlemi yapılmış kapalı gözenekli alüminyum köpüğün kesit görünüşü verilmiştir. Üretilen Al esaslı köpükler de gözenek dağılımının homojen olduğu, gözeneklerin küresele yakın şekilde oluştuğu ve gözenek duvar kalınlıklarının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.



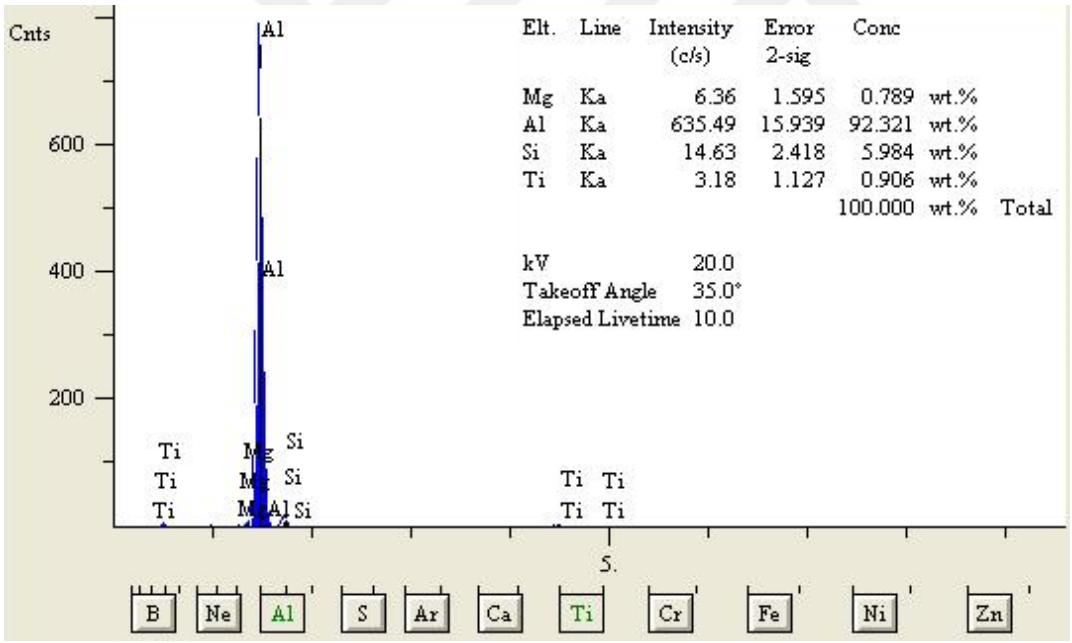
Resim 3.13. Al köpüğün optik mikroskop altındaki gözenek ve gözenek boyutu görünüşleri

Kapalı gözenekli alüminyum köpüğün gözenek morfolojisi için SEM analizleri JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında yapılmıştır. Şekil 3.14'de homojen yapılı kapalı gözenekli alüminyum köpüğün gözenek duvarı, gözenek ve gözenek yüzeyindeki kırıklar görülmektedir.



Resim 3.14. Al köpüğün taramalı SEM'de gözenek ve gözenek duvarına ait mikroyapı görüntüleri

Resim 3.15'da Al köpüğün gözeneklerinin birleştiği noktadan alınan EDX analizinde Al, Mg, Si ve Ti elementlerine ait pik'lerin ağırlıkça %'si verilmiştir.



Resim 3.15. Al köpüğün EDX analizi

3.9. Al köpük Test Numuneleri Ölçüm Parametreleri

Isı iletim katsayısı ölçümleri için farklı gözeneklilik oranları ve yoğunluk değerlerine sahip 6 adet köpük kullanılmıştır. Al köpük test numunelerini makro yapı özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Alüminyum köpüğün makro yapı özellikleri

Numune Tipi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Gözenek boyutu (mm)	Yoğunluk (ρ-g/cm^3)	Gözenek oranı (ϕ)
1	50	≈ 14	2,64	0.62	77.29
2	50	≈ 14	2,72	0.63	76.20
3	50	≈ 14	2,66	0.64	75.24
4	50	≈ 14	2,59	0.68	73.44
5	50	≈ 14	2,55	0.79	70.01
6	50	≈ 14	2,78	0.84	68.27

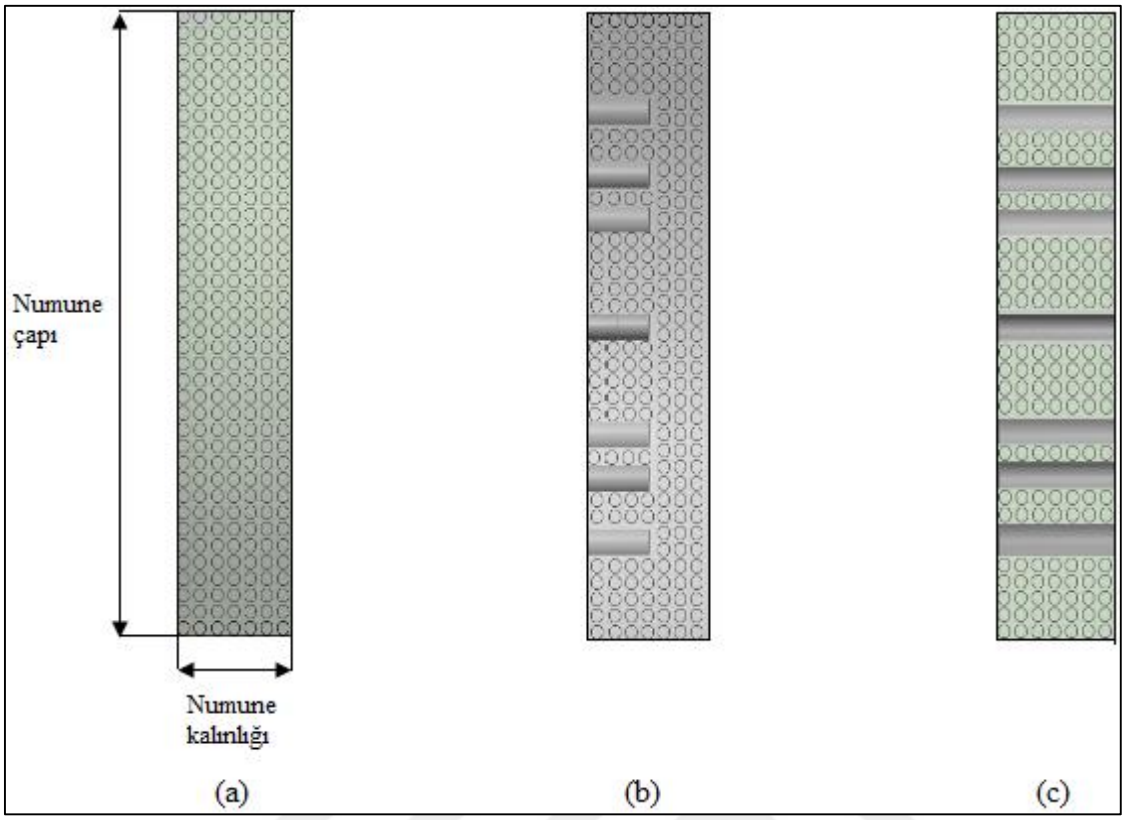
Akustik testlerde kullanılan katmansız yapıdaki Al esaslı köpük numunelerin makro yapı özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Alüminyum köpüğün makro yapı özelikleri

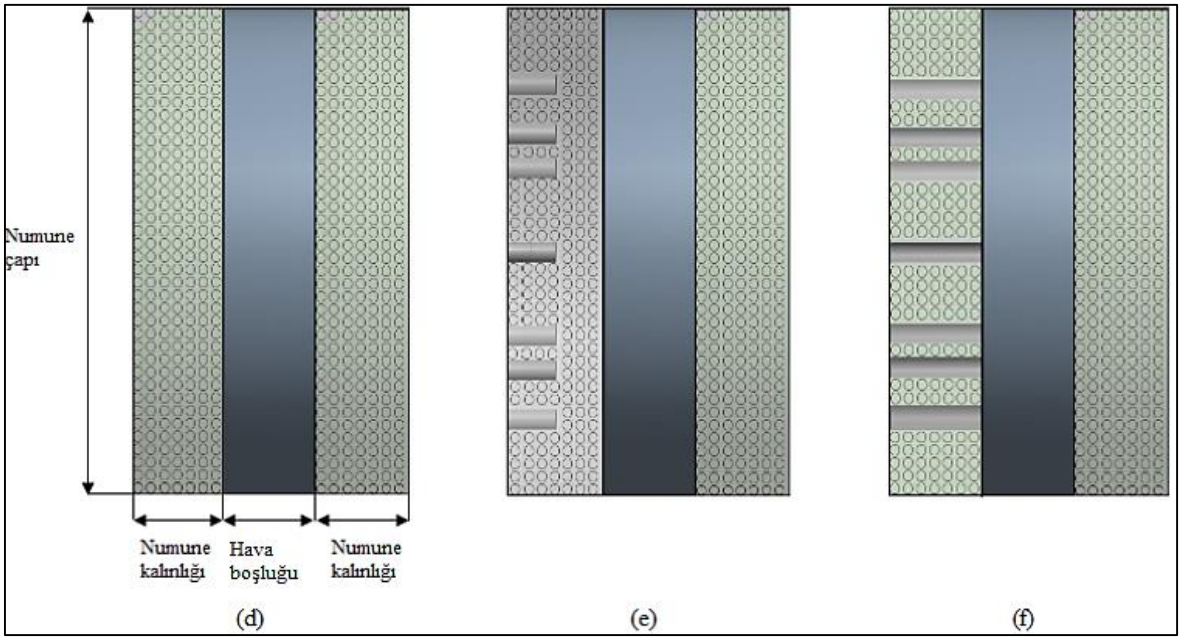
Numune Tipi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Gözenek boyutu (mm)	Yoğunluk (ρ- g/cm^3)	Gözenek oranı (ϕ)
1	28	≈ 20	2,2-2,6 mm ∓ 0,5	0,44 ∓ 0,5	87
2	28	≈ 20	2,2-2,6 mm ∓ 0,5	0,51 ∓ 0,5	82
3	28	≈ 20	2,2-2,6 mm ∓ 0,5	0,64 ∓ 0,5	77
1	100	≈ 20	2,2-2,6 mm ∓ 0,5	0,44 ∓ 0,5	87
2	100	≈ 20	2,2-2,6 mm ∓ 0,5	0,51 ∓ 0,5	82
3	100	≈ 20	2,2-2,6 mm ∓ 0,5	0,64 ∓ 0,5	77

Akustik testlerde kullanılan numuneler 6 farklı tip olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Şekil 3.7 (a-f)'de kapalı gözenekli Al köpük deney numunelerinin yan kesit görüntüsünün şematik diyagramları görülmektedir. Üzerinde herhangi bir ikincil işlem yapılmamış numune Şekil 3.7 (a) Tip 1 olarak adlandırılmıştır. Yarı delik delinmiş (numune kalınlığının yarısı) numune Şekil 3.7 (b) Tip 2 olarak adlandırılmış ve tam boy delik delinmiş (numune kalınlığı boyunca) numune Şekil 3.7 (c) Tip 3 olarak adlandırılmıştır.

Bunlara ek olarak üçüncü katman sabit olacak şekilde deliksiz, yarım delikli ve tam delikli Al köpük numunelerin aralarına 20 mm hava boşluğu bırakılarak üç tabakalı köpük yapı kombinasyonları Şekil 3.8 (d-f), sırasıyla tip 4, tip 5 ve tip 6 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.7. (a-c) Kapalı gözenekli Al köpük deney numunelerinin yan kesit görüntüsü



Şekil 3.8. (d-f) Katmanlı kapalı gözenekli Al köpük deney numunelerinin yan kesit görüntüsü

Akustik testlerde kullanılan farklı yapılardaki Al esaslı köpük numunelerin makro yapı özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te verilmiştir.

İlk üç tip kapalı gözenekli Al köpüğün ayrıntılı yapısal parametreleri Çizelge 3.4'de listelenmiştir.

Çizelge 3.4. Farklı delik boyuna sahip Al köpük numuneler

Numune Tipi	Frekans aralığı (Hz)	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Delik boyu (mm)
1	50-1500	100	20	0
	800–6300	28	20	0
2	50-1500	100	20	10
	800–6300	28	20	10
3	50-1500	100	20	20
	800–6300	28	20	20

Çizelge 3.5'te, farklı kalınlıktaki hava boşluklarına sahip numunelerin detaylı yapısal parametreleri görülmektedir.

Çizelge 3.5. Farklı hava boşluğuna sahip Al köpük numuneler

Numune Tipi	Frekans aralığı (Hz)	Tabaka	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Delik boyu (mm)	Hava boşluğu (mm)
4	50-1500	Birinci	100	20	0	-
		İkinci	-	-	-	20
		Üçüncü	100	20	0	-
	800–6300	Birinci	28	20	0	-
		İkinci	-	-	-	20
		Üçüncü	28	20	0	-
5	50-1500	Birinci	100	20	10	-
		İkinci	-	-	-	20
		Üçüncü	100	20	0	-
	800–6300	Birinci	28	20	10	-
		İkinci	-	-	-	20
		Üçüncü	28	20	0	-
6	50-1500	Birinci	100	20	20	-
		İkinci	-	-	-	20
		Üçüncü	100	20	0	-
	800–6300	Birinci	28	20	20	-
		İkinci	-	-	-	20
		Üçüncü	28	20	0	-

3.10. Metot

Bu bölüm'de üretilen Al köpük malzemelerin ısıl ve akustik testlerinin yapılmasına yönelik hazırlık, standartlar, numune özellikleri, test sistemi ve ölçüm işlemleri konusunda teknik bilgiler verilmiştir.

3.10.1. Al köpüğün ısı iletim katsayısının ölçümü

Al köpüklerin ısı iletim katsayıları ASTM E1530-11 [124] standardına uygun olarak Maden Tetkik ve Arama (MTA) Laboratuvarında bulunan Unitherm Model 2022 ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Resim 3.16). Isı iletim katsayısı ölçümleri – 20 ºC ve + 200 ºC sıcaklıklar arasında 50 mm çapında ve 25 mm'den küçük numune kalınlıkları olan malzemelerin ısıl iletimine karşı direncinin (ısıl direnç) belirlenmesine yönelik kararlı hal tekniğini kapsamaktadır. Ölçüm cihazı Al köpüklerin ısıl iletim katsayılarını ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemini kullanarak belirlemektedir.



Resim 3.16. EIK ölçüm cihazı ve ekipmanlarının genel görünüşü: 1.Numune boyunca geçen sıcaklığı ve silindir basıncını denetlemek için kontrol paneli, 2. Otomatik sıcaklık kontrollü soğutucu (Chiller), 3. Isı Akış Ölçer Dönüştürücü (Heat Flow Transducer- HFT), ısıtıcı muhafazası ve numune bölümü, 4. Yazılım ve veri toplama sistemi ile bilgisayar

3.10.2. Isı iletim katsayısı ölçüm yöntemi

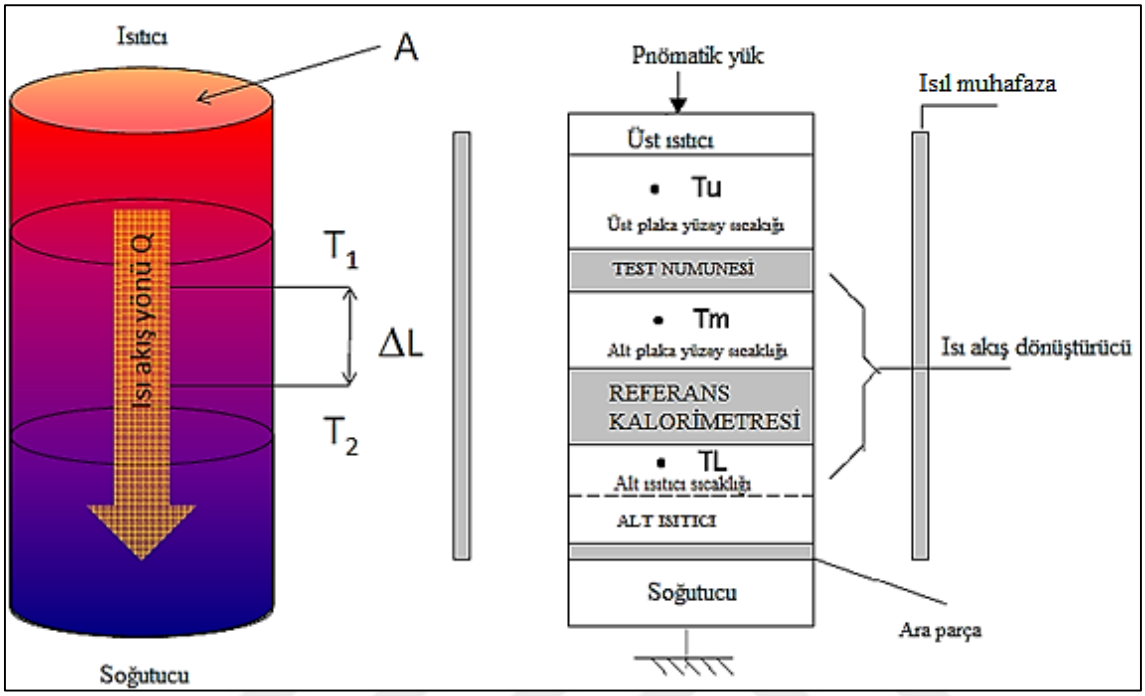
Isı iletim katsayısı ölçümü kalibrasyonu yapılmış test cihazı kullanılarak ısı akış ölçer yöntemi ile kararlı durum sıcaklık dağılımı sağlanarak ölçülmüştür. Numunenin ortalama sıcaklığı, ısı akışı bozulmalarını önlemek ve tek boyutlu bir ısı akışını sağlamak için termokupllar vasıtasıyla kontrol edilir. Isı iletim katsayısının ölçümü, Tu, Tm, Tl, termokupllardan okunan sıcaklık değerlerinin sabit değere ulaştığında yapılır. Bu durum, Al köpükleri için sıcaklıkların 30 °C, 60 °C ve 90 ∓ 1°C'ye ulaştığında kararlı duruma gelmesidir.

Al köpük, her biri farklı bir sıcaklıkta kontrol edilen iki plaka arasında muntazam bir sıkıştırma yükü altında tutulur. Al köpük numune ve bir ısı akış ölçer dönüştürücü (IAÖ), test numunesi boyunca bir ısı akışı üretmek için farklı sıcaklıklarda kontrol edilen iki düz plaka arasında sıkıştırılır. Alt temas yüzeyi (numune ile) kalibre edilmiş bir ısı akısı dönüştürücüsünün parçasıdır. Numune ve plaka yüzeyleri arasında tekrarlanabilir bir temas direncinin bulunduğundan emin olmak için test numunesine pnömatik bir silindir ile tekrarlanabilir bir yük uygulanır.

Isı akış ölçer (IAÖ) farklı sıcaklık değerlerine ayarlanabilen iki metal plakaya sahiptir. Bu metal plakaların elektron yoğunluklarının farklı olması nedeniyle elektrik akımı uygulandığında elektronlar hareket ederek ayrıldığı yüzeyin sıcaklığını düşürürken gittiği yüzeyin sıcaklığını arıttır (Peltier etkisi). Plakalar bu yöntem ile istenilen sıcaklık değerlerine ayarlanabilmektedirler. Numunenin içerisindeki sıcaklık düşüşü, numunenin her iki tarafındaki yüksek iletken metal yüzey tabakalarındaki sıcaklık sensörleri ile ölçülür.

Al köpüğü çevreleyen bir yalıtım muhafazası ile numuneye ve numuneden yanal ısı akışını en aza indirmek için iki tabaka üniform bir ortalama sıcaklık aralığında tutulur. Isı, üst yüzeyden Al köpüğün alt yüzeyine doğru akar ve köpük içerisinde bir eksenel sıcaklık gradyanı oluşur. Termal dengeye ulaştıktan sonra, numune boyunca sıcaklık farkı, numuneye temas eden yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı IAÖ'nin çıkışındaki sıcaklık sensörleri ile ölçülür. EIK ölçüm cihazında ısı akışı dönüştürücüsü $\dot{Q}$ değerini belirler ve üst plaka ve alt plaka arasında sıcaklık farkı elde edililir (Şekil 3.9). Böylece üst ve alt yüzeyler arasında ısıl direnç hesaplanabilir. Son olarak, IAÖ'den elde edilen ısıl direnç ve

ölçülen numune kalınlığı ile kalibre edilmiş bilgisayar yazılımında Fourier ısı iletim denklemini kullanılarak ısı iletim katsayısı hesaplanır.



Şekil 3.9. EIK ölçüm cihazı bölümlerinin şematik görünümü [125]

Farklı sıcaklık değerlerinin elde edilmesinde kullanılan sıcak ve soğuk plakanın sıcaklıkları, ortalama sıcaklık ve iki plaka arasındaki sıcaklık farkı Çizelge 3.6'da verilmiştir.

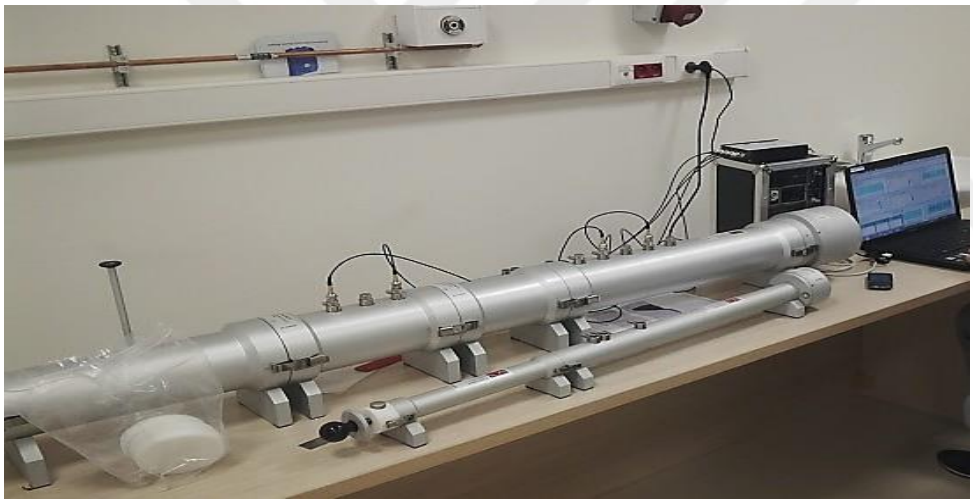
Çizelge 3.6. Kararlı haldeki sıcaklık değişimleri

Ortalama sıcaklık (°C)	Üst plaka sıcaklığı (°C)	Alt plaka sıcaklığı (°C)	Sıcaklık farkı ΔT (°C)
30	39.01	22.66	16.35
60	68.80	52.14	16.66
90	99.00	82.41	16.59

3.10.3. Al köpüğün ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri

Malzemelerin ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümü için birçok yöntem kullanılmaktadır. Malzemelerin ses yutum ve iletim kaybı özellikleri genellikle standart yankılanma odası yöntemi ile ölçülür ancak ölçüm, büyük boyutlu test numuneleri gerektirir. Bu nedenle, büyük boyutlarda üretilmesi zor olan malzemelerin (metalik köpük vb.) dik geliş ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı, küçük örneklerle bir empedans tüpü kullanılarak ölçülür.

Empedans tüpü ölçüm yöntemi; testte kullanılan numunelerin kolay üretilebilmesi, numune boyutlarının küçük olması ve test sürelerinin kısa olması nedeniyle oldukça kullanışlıdır (Resim 3.17).



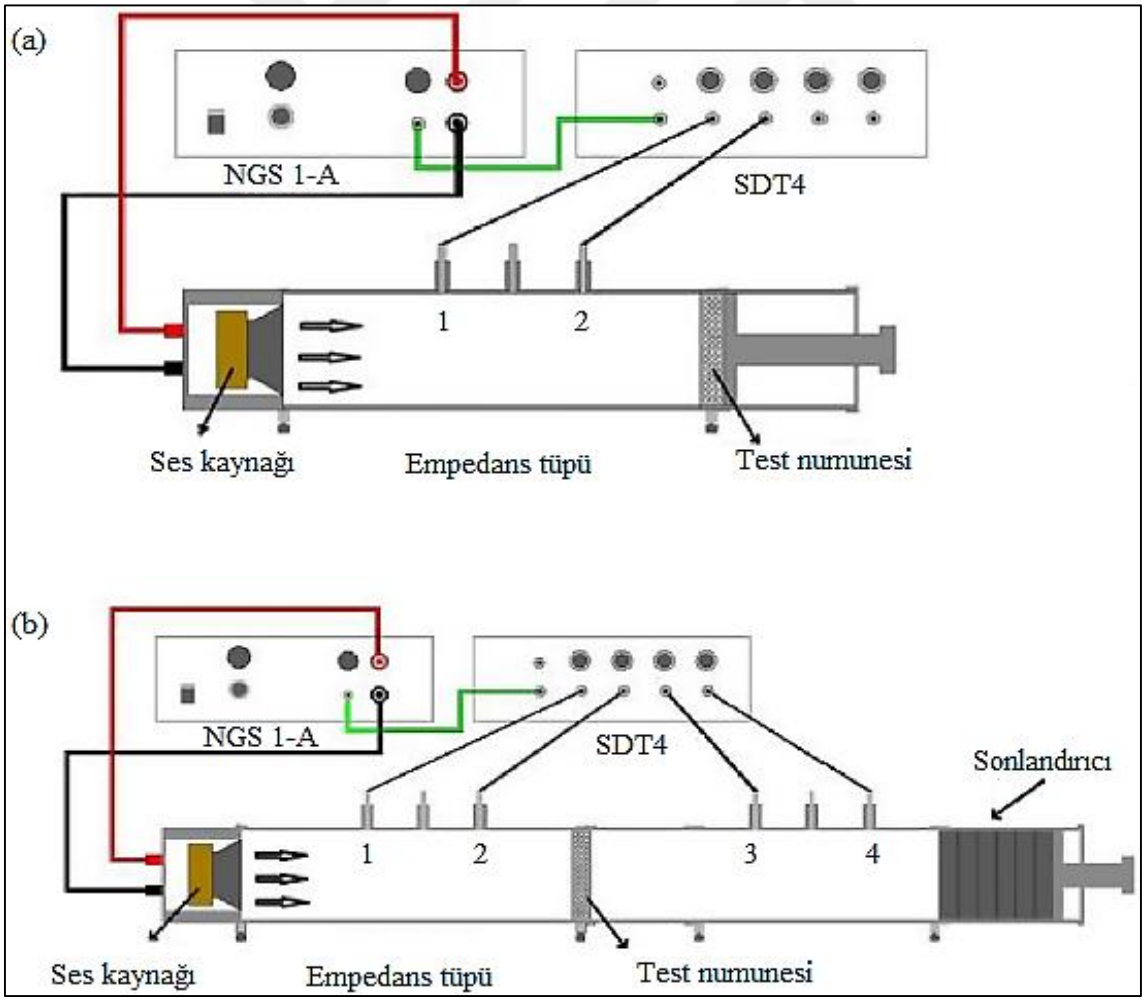
Resim 3.17. Empedans tüpü genel görünüşü

Diğer yöntemler incelendiğinde, bir çoğunda büyük malzeme örneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum hem ölçüm zorluğuna hem de yüksek maliyete neden olmaktadır. Bu yöntem, AR-GE çalışmalarında akustik malzemelerin geliştirilmesinde kolaylık ve avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, akustik malzemelerin tahmini modellerinin doğrulanmasında oldukça sık bir biçimde kullanılmaktadır.

Empedans tüpü ölçüm yöntemi, test numunesinin yüzeyinde oluşan akustik empadansının (yüzey empedansı) etkiyen ve yansıyan ses dalgalarının ölçülmesi ile bulunması ve elde edilen yüzey empedansı değerinden ses yutum katsayısı ve iletim kaybı değerinin hesaplanması prensibine göre çalışır.

3.10.4. Test ekipmanı ve ölçüm düzeneğinin tanıtılması

Ses yutum katsayıları ve ses iletim kayıplarının bulunması için gerekli ölçüm düzeneği, SCS & Partners firmasının SCS9020B/K tipi düşük frekanslar (50 Hz- 1500 Hz) için 100 mm çapında ve yüksek frekanslar (800 Hz- 8000 Hz) için 28 mm çapında empedans tüpleri, 4 ¼" mikrofonlar, SDT4 4 kanallı dijital frekans analiz sistemi, NGS 1-A gürültü üreteci ve bir bilgisayardan oluşmaktadır. Ölçüm sisteminde sinyal üretimi ve verilerin toplanması için SpectraPLUS-DT yazılımı kullanılmıştır. Empedans tüpü mikrofan kalibrasyonu ve verilerin işlenmesi için Matlab kodları kullanılarak geliştirilen SCS 90AT yazılımı kullanılmıştır. Sırasıyla ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı hesaplanırken iki mikrofon transfer fonksiyonu yöntemi ve dört mikrofon yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.10'da Empedans tüpleri ile ölçüm yapılırken kullanılan ölçüm düzeneği, bağlantıların ayrıntıları ve numunelerin pozisyonlarını görülmektedir.



Şekil 3.10. Ses yutum katsayısı (a) ve ses iletim kaybını (b) ölçüm düzeneği şematik görünüşü [121]

3.10.5. Ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçüm yöntemi ve standartları

Ses yutum katsayısının empedans tüpleri ile ölçümünde birçok metot bulunmasına rağmen, iki adet uluslararası kabul görmüş standart metot mevcuttur: ISO 10534-1 duran dalga oranını kullanma metodu [126] ve ISO 10534-2 transfer fonksiyonu metodu [127]. Duran dalga metodunda her bir seferde bir frekansa ait ses yutum katsayısı ölçülebildiğinden transfer fonksiyonu metodu, duran dalga metoduna göre daha hızlı ve kesin sonuçlar üretmektedir.

Her iki metot da küçük test parçaları üzerinde deney yapılabilmesi üzerine tasarlanmıştır. Ölçümlerde iki farklı çapta empedans tüpü kullanılması nedeniyle tüm frekansların taranması için iki farklı numune boyutuna ihtiyaç vardır. Empedans tüpünde ses iletim kaybı ölçümü ise standarda dayalı bir ölçüm metodu değildir.

Al köpüğün frekansa bağlı ses yutma katsayısı, ses iletim kaybı ölçümleri TSE Tuzla Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarında yapılmıştır. Ölçümler, TS EN ISO 10534-2 [127] standardına uygun yapılarak Al köpüğün frekansa bağlı olarak ses yutum katsayısı, iletim kaybı özellikleri belirlenmiştir. Deneysel uygulamalarda 6 farklı tipte tek tabakalı ve hava boşluklu, üç tabakalı hava boşluklu kombinasyonları ile metalik köpük malzemenin ses yutma katsayıları ve ses iletim kaybının 1/3 oktav bantlarında ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler 24 °C sıcaklık ve % 43,4 bağıl nem ortam şartlarında yapılmıştır. Ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri için izlenen test akış şeması Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri akış şeması

Ses yutma katsayısı ölçümleri için daha önce de bahsedildiği gibi iki ayrı tüp ile ölçüm yapılmıştır. Büyük ve küçük tüp ile yapılacak ölçümler öncesi, kalibrasyon işlemi

yapılmaktadır. Ses yutma katsayıları ölçülürken mikrofonların yer değiştirilmesi durumunda belli bir faz ile simetrik transfer fonksiyonlarının elde edilip edilmediği kontrol edilmiştir.

Empedans tüpünde mikrofonları değiştirerek yapılan ölçümün amacı, iki farklı kanal ile yapılan ölçümlerin kıyaslanması ve ölçüm sisteminin test edilerek ölçümün doğruluğunun kanıtlanmasıdır. Mikrofonlar daha önce faz için kalibre edilmiş ve transfer fonksiyonu yönteminin geçerliliği için uygun bir mikrofon anahtarlama tekniği ile eşleştirme yapılmıştır. Kullanılabilir frekans aralığı, tüpün çapına ve mikrofon pozisyonları arasındaki mesafeye bağlıdır.

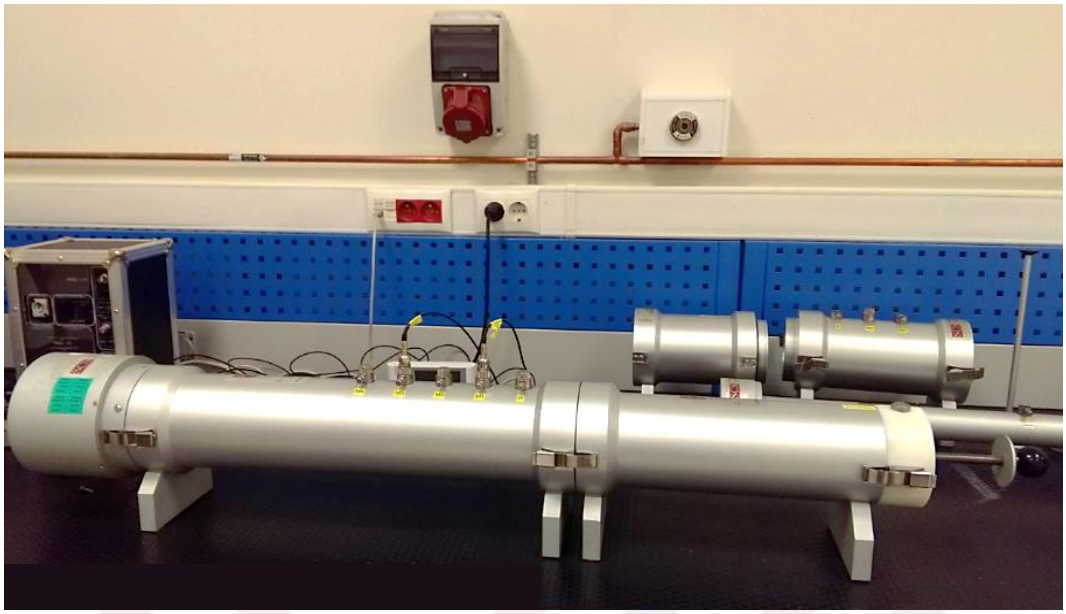
3.10.6. Empedans tüpü ses yutum katsayısı ölçümü

Standartlara girmiş ve Transfer Fonksiyon (TF) metodunun avantajı, yüzey empedansı ve ses yutum katsayısı değerlerinin empedans tüpü çaplarına göre değişmekle birlikte 50-6300 Hz aralığında bütün frekanslar için tek bir ölçümde elde edilmesidir.

Ölçüm düzeneğinde, tüpün bir ağzında yükselticisi ile birlikte gürültü üreten bir hoparlör ve diğer ağzında ise numune parça bulunmaktadır. Üretilen gürültüde ses her frekansta aynı enerjiyi taşımakta olup gürültü spektrumu (frekans-ses basınç düzeyi) grafiği her frekansta eşit bir dağılım gösterir.

Ses yutum katsayısı ölçümünde ses kaynağı, tüp içerisinde malzemeye doğru düzlemsel bir ses dalgası oluşturarak sesin malzemeden yansıması sağlanır. Tüpe bağlı iki mikrofonuda numuneye etkiyen ve numuneden yansıyan ses dalgalarının ayrı ayrı ses basınçları ölçülerek transfer fonksiyonu çıkarılır. İki mikrofondan alınan sinyaller arası transfer fonksiyonu iki mikrofondan ayrı ayrı ölçülen basınç değerlerinin bir oranıdır. Elde edilen yüzey empedansından ses yutum katsayısı hesaplanır. Yapılan işlemler bilgisayar yazılımları vasıtası ile kolaylıkla gerçekleştirilir.

Ses yutum katsayısı ölçümleri yapılacak malzemeler, Resim 3.18'de gösterilen empedans tüpünde, ardışık olarak bağlı iki mikrofonun sağ tarafında yer alan bölmeye yerleştirilir. Tüp içeresindeki malzeme, malzemenin arkasında bir boşluğun oluşmaması ve dolayısıyla ses geçişini engellemek amacıyla rijit bir desteğe yaslanmaktadır.



Resim 3.18. Ses yutum katsayısı ölçümünde kullanılan empedans tüpü

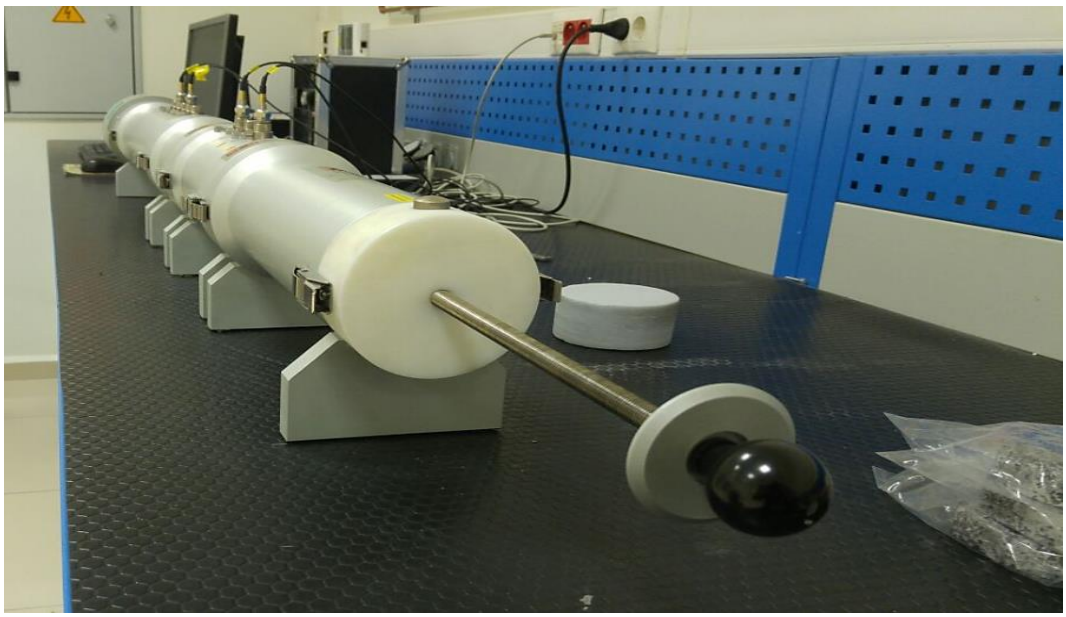
Ses yutum katsayısı ölçümünde her numuneden üçer adet küçük ve büyük çaplı parçalar kullanılarak üç tane ölçüm gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, ses yutma katsayılarının küçük ve büyük çaplı numunelerinin ölçüm sonuçları birleştirilmiş ve ortak frekans aralığındaki değerler yazılım tarafından birleştirilerek bütün frekans bandı için grafiklere yansıtılan ses yutum katsayıları elde edilmiştir. Benzer yöntem ses iletim kaybı için de izlenmiştir**.**

3.10.7. Empedans tüpü ses iletim kaybı ölçümü

Ses iletim kaybı ve ses yutma katsayısı ölçümleri için farklı empedans tüpleri kullanılmaktadır. Ölçüm analizleri aynı akustik analiz programının farklı modülleriyle gerçekleştirilmektedir. Akustik malzemelerin ses iletimi kaybının ölçümlerinde, dalga alanı ayrıştırma yöntemi ve transfer matrisi yöntemi esas alınmaktadır. Her iki teknikte dört mikrofonlu bir dalga tüpü ve bir FFT analizörü kullanılır. İki yüklü ve iki kaynaklı yöntemler, en yaygın kullanılan transfer matrisi yaklaşımlarıdır. Transfer matrisi, karmaşık ses basınçları ile gözenekli bir malzemenin iki yüzündeki karmaşık dik geliş akustik partikül hızları arasındaki ilişkiyi tanımlar. Empedans tüpünde TL, ölçümünde uygulama kolaylığı nedeniyle iki yük yöntemi kullanılmıştır.

Ses iletim kaybı ölçümleri yapılacak malzemeler mikrofon çiftlerinin arasında yer alan bölmeye yerleştirilir. Böylece iki adet ölçüm ortamı oluşturulur. Bu düzenekte hem ses kaynağı tarafından etkiyen bölümde hem de numunenin arkasındaki tüp üzerinde 2

mikrofon olmak üzere toplamda 4 mikrofon aracılığı ile veriler alınır. Ses iletim kaybı için kullanılan empedans tüplerinde, ses yutma katsayılarının yapıldığı empedans tüplerinin aksine malzemeler herhangi yüzeye yaslandırılmaz. Malzemenin her iki tarafında da boşluk bulunması ve dolayısıyla ses iletiminin gerçekleşmesi istenir. Ses kaynağı sayesinde oluşan düzlemsel ses dalgaları malzemeye çarpar ve bir kısmı yansıyarak geri dönerken, bir kısmı malzeme tarafından yutulur ve bir kısım ise malzeme içerisinden geçerek tüpün diğer ucuna doğru yönelir. Al köpük içerisinden geçen ses dalgalarının bir kısmı ise tüpün diğer ucundan geri yansır, bir kısmı ise dışarıya doğru yönelir (Resim 3.19).



Resim 3.19. Transfer matrisi yöntemi ile ses iletim kaybı ölçüm düzeneği

Tüpler yutumdaki gibi yerleştirilir ve mikrofonlar sırayla kalibre edilir. Kalibrasyon tamamlandıktan sonra bu iki tüpün arasına 2 tüp daha eklenir. Malzeme, aradaki tüplerden kaynağa yakın olan tüpün kaynak tarafına yerleştirilir. Bu tüpe eklenen diğer tüpte ise 2 adet mikrofon bulunmaktadır. Kaynak tarafındaki mikrofonlar, kaynak gürültü seviyesini ölçerken, diğer tüpteki mikrofonlar, malzemeden geçtikten sonra alıcı kısımdaki gürültü miktarı ölçülür. En sonda ise yine pistonlu tüp bulunmaktadır, yalnız bu sefer yutumdaki durumun aksine piston en açık durumdadır. Bu tüpte pistonun hemen önüne bir referans yük yerleştirilir. İlk ölçüm tamamlandıktan sonra referans yükün üzerine bir yük daha yerleştirilir ve tekrar ölçüm yapılır. İki ölçümde toplanan veriler, verileri işleyen programa aktarılır. Düşük ve yüksek frekanslar için ayrı ayrı bu prosedür uygulanır. Son işlem olarak

düşük-yüksek grafikler birleştirilir. Dört kanallı dijital frekans analizöründe toplanan veriler yazılım vasıtasıyla transfer matrisinde çözdürülerek malzemenin ses iletim kayıpları elde edilir.

3.10.8. Ses yutum katsayısı ve iletim kaybı ölçüm hassasiyeti

Empedans tüpüyle yapılan ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümlerinde, ölçüm sonuçları üretilen malzemelerin istenilen boyutlarda kesilme hassasiyeti ve tüplere düzgün bir şekilde yerleştirilmesine doğrudan bağlıdır. Tüp, ölçüm bölgesinde özellikle örnek malzemenin sabitlendiği ve mikrofonun yerleştirildiği kesimlerde sabit bir kesit alanına sahip olmalıdır.

Tüp içerisinde kayıplar minimize etmek için, tüp içerisi pürüzsüz ve temiz olmalıdır. Numune etrafındaki boşluklar doldurulmalı ve sızdırmazlık sağlanmalıdır. Böylece düzlemsel dalgalar ciddi bir sönüme maruz kalmadan ilerleme kaydedebilmelidir. Aksi durumda numune kenarlarında boşluklar ölçülen ses yutum ve iletim değerleri olması gerekenden daha yüksek görülecektir. Aynı zamanda malzemenin tüpün içeresinde sıkışacak şekilde yerleştirilmesinden kaçınılmalıdır çünkü böyle bir hareket yutum elemanının yapısını değiştirecek, yay-kütle davranışını izlemesine neden olacak ve bu sebeple yanlış ses yutum ve iletim değerleri elde edilecektir.

4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde, alüminyum esaslı kapalı gözenekli köpük numuneler kullanılarak yapılan ısıl ve akustik testlerin sonuçları verilmiştir. Isıl testlerden elde edilen etkin ısı iletim katsayıları (EIK) verileri sıcaklık, gözeneklilik ve yoğunluğa bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Akustik testlerden elde edilen verileri kullanılarak frekansa bağlı ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı karşılaştırma sonuçları grafikler halinde sunulmuştur.

4.1. Al Köpüğün Etkin Isı İletim Katsayısı Değerleri

Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, kapalı gözenekli alüminyum alaşımının EIK'sı gözeneklilik ile karmaşık bir ilişki taşımaktadır. Ayrıca Çizelge 4.1'deki verilere göre Al köpük numunelerin yoğunluk ve gözeneklilik oranları birbirine yakın olmasına rağmen farklı ısı iletim katsayısı değerleri ölçülmüştür. Yüksek gözeneklilik düşük ısı iletim katsayısının elde edilmesini sağlamakla birlikte Alüminyum köpüğün EIK geometrik kusurlardan birinin (gözenek duvarı yanlış hizalanmaları, kırılmış gözenek duvarları, eksik gözenekler) varlığı nedeniyle ısı iletim katsayısının azalmasına katkı sağladığı düşünülmüştür.

Çizelge 4.1. Farklı yoğunluk ve mikro yapıya sahip Al köpüğün EIK değişimi

Yoğunluk (g/cm^3)	Gözenek oranıϕ (%)	Gözenek boyutu (mm)	Isı iletim katsayısı (k) 30 ℃ için	Isı iletim katsayısı (k) 60 ℃ için	Isı iletim katsayısı (k) 90 ℃ için
0,84	68,27	2,78	3,46	3,97	4,11
0,79	70,01	2,56	1,80	2,06	2,17
0,68	73,44	2,66	2,02	1,96	2,26
0,64	75,24	2,72	1,60	1,89	2,03
0,63	76,20	2,60	1,55	1,86	1,93
0,62	77,29	2,64	1,22	1,27	1,37

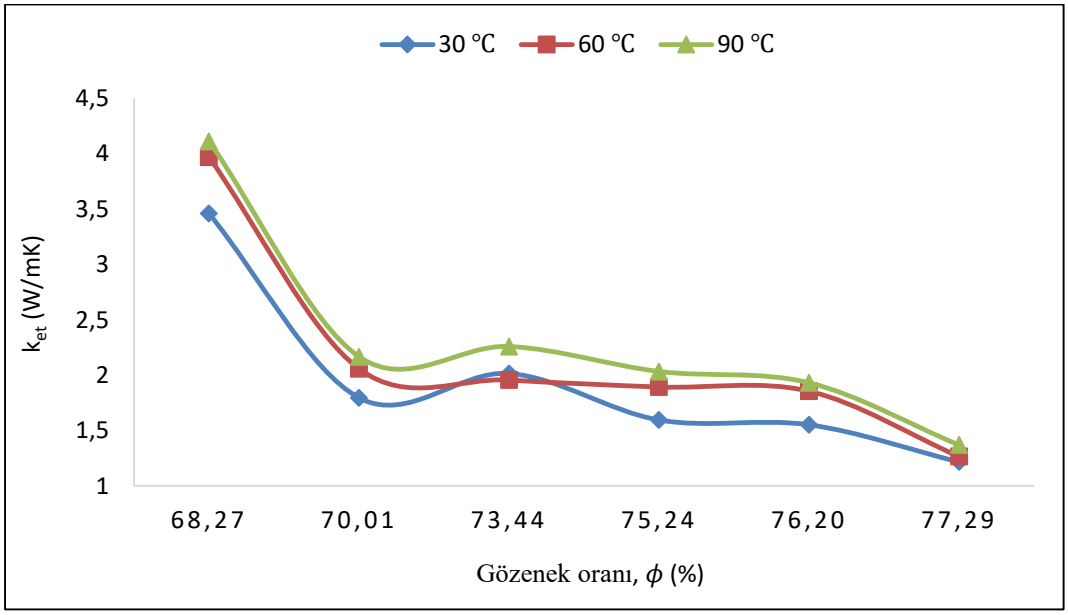
Alüminyum köpük test numunelerinin gözenek boyutu değişimi Çizelge 4.1'de verilmiştir. Gözenek boyutu ısı iletim katsayısını etkilememekle birlikte genel olarak gözenek çapı azaldıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır. Isı iletim katsayısında gözlenen farklılıklar,

matris içindeki malzemenin kalınlığına ve Al köpüğün gözenek morfolojisinden kaynaklanmaktadır.

Artan gözeneklilik oranları ve gözeneklerdeki havanın düşük ısı iletim katsayısı kompozit köpüğün EIK'sı üzerinde belirleyici faktör olmuştur. Isı iletim katsayısı gözenekliliğin azalmasıyla birlikte artmıştır.

Şekil 4.1'de kapalı gözenekli alüminyum köpüğün 30, 60 ve 90 ℃'de ölçülen sıcaklık ve gözeneklilik oranına bağlı EIK değişimi görülmektedir. EIK değerlerinin, gözeneklilik ile doğrusal olmayan şekilde değişmiş ve gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı azalmıştır. Düşük sıcaklıklarda kapalı gözenekli köpük alüminyum malzemelerin ısı iletim katsayısı esas olarak gözeneklilikten etkilenmiştir (Şekil 4.1).

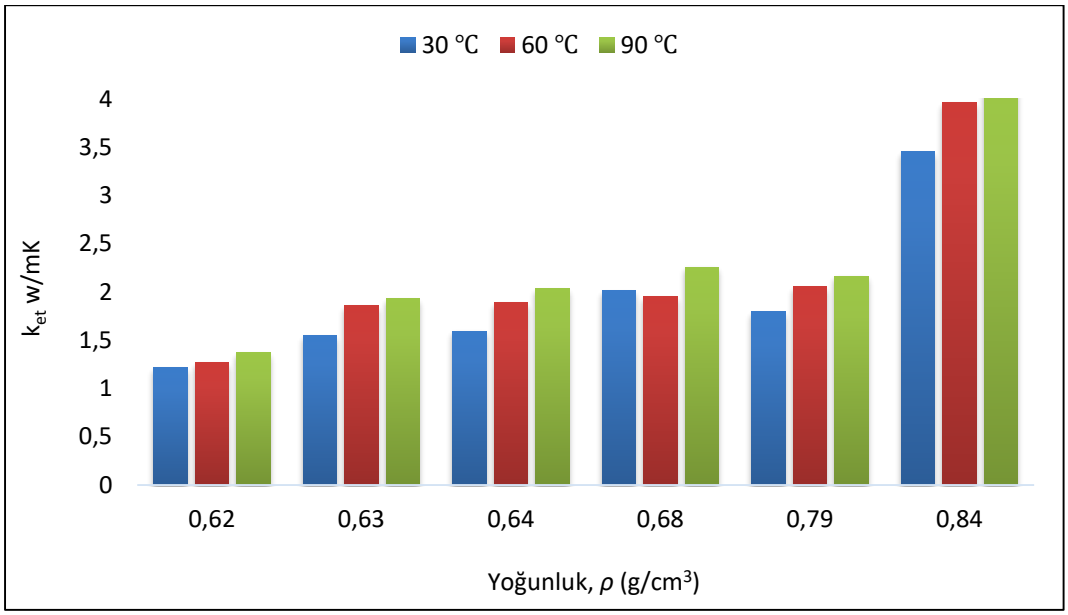
Yüksek sıcaklıklarda metalik köpüğün yapıldığı malzemenin (AlSiMg) ve gözeneklerdeki akışkanın (hava) ısı iletim katsayısı EIK üzerinde ana belirleyici faktörler konumuna gelmiştir. Köpüklerin EIK'lari gözenekliliğin artmasıyla azalırken sıcaklığın artması ile artmıştır. Gözeneklilik % 68,27'den % 77,29'a arttığında Al köpüğün EIK'sı, 4,11 W/mK'den 1,2 W/mK'e düşmüştür. % 70 gözeneklilik değerine kadar gözenek oranı değişimi ısı iletim katsayısını çok fazla değiştirmez iken gözeneklilik % 70'in altına düştüğünde ise, ısı iletim katsayısı hızla artmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Al köpüğün sıcaklık ve gözenek oranına bağlı EIK değişimi (30, 60, 90 ℃)

Al esaslı köpüklerinin yoğunluğa ve sıcaklığa bağlı EIK değişimleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Köpüklerin EIK'lari yoğunluğun artması ile artmıştır. Köpüklerinin EIK'ları arasındaki fark, yoğunluğun ve sıcaklığın azalmasıyla azalmıştır (Şekil 4.2).

Al köpüklerin EIK'ları düşük yoğunluk değerlerinde daha küçük ve birbirine benzer değerlere sahiptir. Gözenek boyutunun ve gözeneklerin topolojik dağılımının ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisi çok küçüktür ve ihmal edilebilir.



Şekil 4.2. Al köpüğün sıcaklık ve yoğunluğa bağlı EIK değişimi (30, 60, 90 °C)

Hem hava hem de alüminyumun ısı iletim katsayısı sıcaklıkla birlikte arttığından, köpüğün EIK'sı sıcaklığın yükselmesi ile artmıştır. Kapalı gözenekli köpüğün ısı iletim katsayısı hem sıcaklık hem de yoğunluğa bağlı olarak değişmiştir.

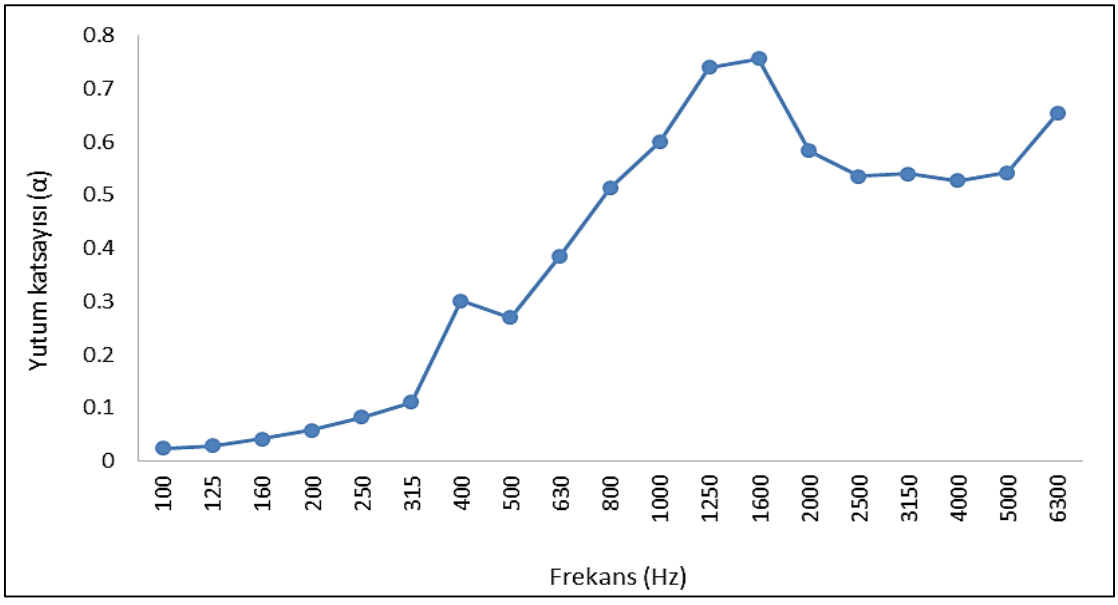
Isı iletim katsayısının gözeneklilik arttıkça azalan doğrultuda, gözenekliliğe karşı oldukça hassas olduğu belirlenmiştir. Gözenek büyüklüğünün EIK üzerinde fark edilir bir etkisi gözlenmemiştir. Bu çalışmada üretilen Al köpükler ile yapılan testlerden elde edilen EIK değerleri 1,2-4,11 W/mK arasında değişmektedir. Ayrıca gözenek oranı 0,8'den küçük olmasına karşın farklı çalışmalarda elde edilen 1,7-6 W/mK arasındaki EIK değerlerine yakın olmakla birlikte 30 °C sıcaklık ve % 77,29 gözenek oranında birçok metalik köpükleri ile karşılaştırıldığında daha düşük EIK değerleri ölçülmüştür [52,128].

4.2. Al Köpüğün Ses Yutum Katsayısı

Bu bölümde, alüminyum esaslı köpük numunelerin akustik performansı ses yutum ve ses iletim kaybı üzerinden değerlendirilmiştir. Akustik ölçümler sırasıyla 100 mm çaplı (50-1500 Hz frekans aralığında) ve 28 mm çaplı (frekans aralığı 800-8000 Hz) olan empedans tüplerinde gerçekleştirilmiştir.

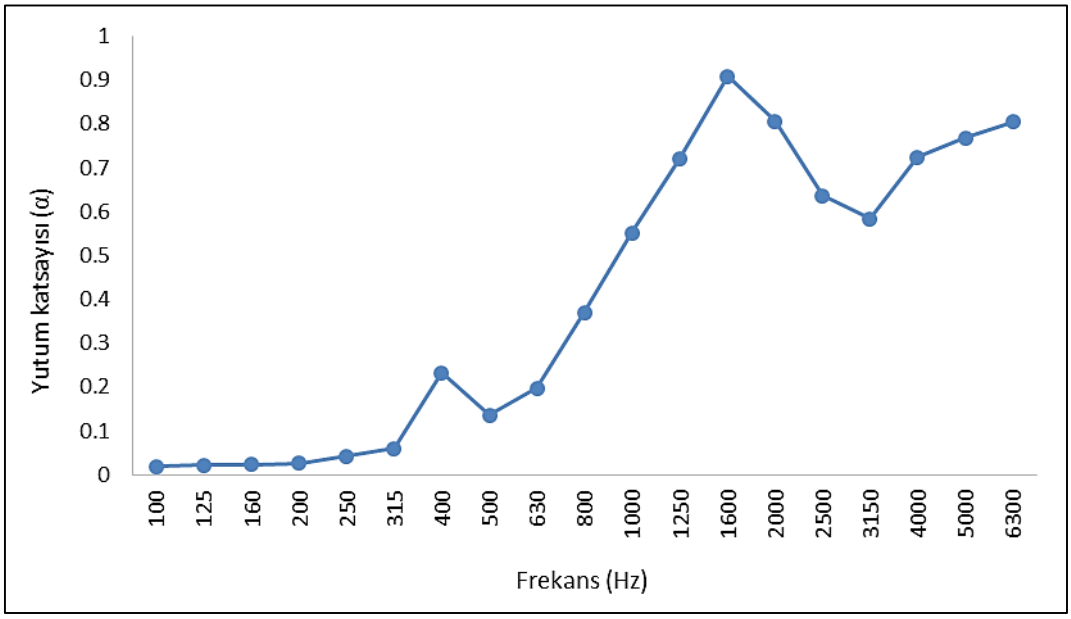
Empedans tüpünde yapılan frekansa bağlı ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri 1/3 oktav bandında 100 Hz ile 6300 Hz frekans aralığında sayısal tablo ve grafik halinde raporlanmıştır. Al köpüklerin yutum ve iletim kaybı ölçümleri için, her ölçüm için üç numune kullanılmış ve elde edilen verilerin ortalaması kullanılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonuçları grafikler halinde verilmiştir.

Tip 1 (delik delinmemiş) köpük numunesinin empedans tüpünde ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.3'de görülmektedir. En yüksek yutum katsayısı 1600 Hz'de 0,76 olarak ölçülmüştür. Daha sonra 3159 Hz'e kadar azalma eğilimi gösteren ses yutum katsayısı tekrar artış eğilimi göstererek 2. pik noktası olan 6300 Hz'de 0,65 maksimum ses yutum katsayısı değerine ulaşmıştır.



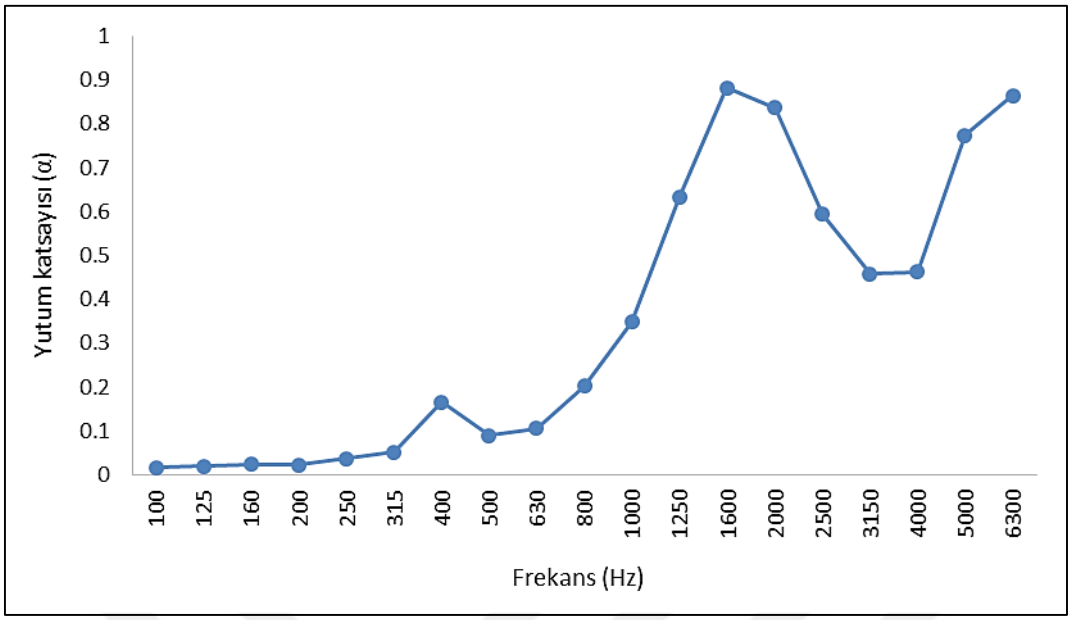
Şekil 4.3. 1. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği

Tip 2 Al köpük deney numunesi kalınlığının yarısı olacak ölçüde (10 mm) 2mm çapında % 2 oranında delikler delinmiştir. Tip 2 (2. Tip) köpük numunesinin ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.4'de görülmektedir. En yüksek yutum katsayısı 1600 (Hz)'de 0,91 olarak ölçülmüştür. Daha sonra 3150 Hz'e kadar azalma eğilimi gösteren ses yutum katsayısı tekrar artış eğilimi göstererek 2. pik noktası olan 6300 Hz'de 0,80 maksimum ses yutum katsayısı değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.4. 2. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği

Tip 3 Al köpük deney numunesi, numune kalınlığı kadar olacak ölçüde (20 mm) 2mm çaplı % 2 oranında delikler delinmiştir. Tip 3 köpük numunesinin ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.5'de görülmektedir. En yüksek yutum katsayısı 1600 (Hz)'de 0,88 olarak ölçülmüştür. Daha sonra 3159 Hz'e kadar azalma eğilimi gösteren ses yutum katsayısı tekrar artış eğilimi göstererek 2. pik noktası olan 6300 Hz'de 0,87 maksimum ses yutum katsayısı değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.5. 3. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği

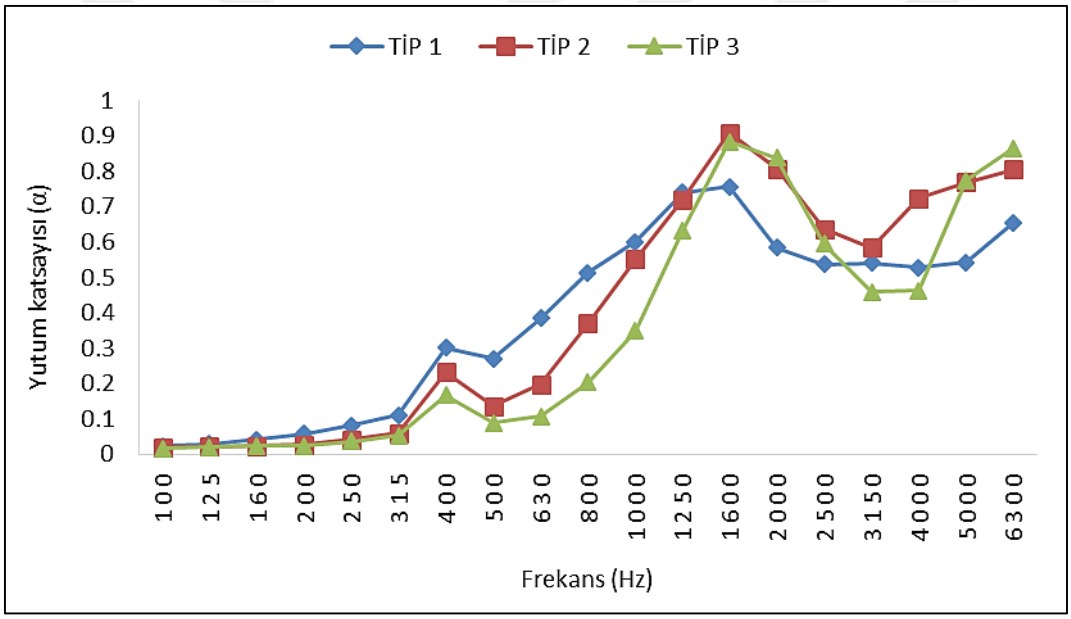
Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, ses yutum katsayıları frekans arttıkça artmaktadır. 2 ve 3. Tip Al köpüğün yarım ve tam boy delik delme işlemi maksimum ses yutum katsayısı değerini tip 1 için ölçülen 0,76'dan sırasıyla 0,91 ve 0,88 pik noktalarına taşımış ve yüksek frekanslarda ses yutum değerlerinde meydana gelen artışlar daha da belirginleşmiştir.

Kapalı gözenekli köpüğün ses yutumunu arttırmak için kullanılan delik delme yöntemi gözenekli ortamın iki fazı (akışkan faz–hava ve katı iskelet) arasında göreli (bağıl) hareketi sağlayarak viskoz etkileri arttırmayı amaçlamaktadır. Delikler kendisini çevreleyen (etrafındaki) havaya açılır ve delik boyunca bazı gözenekler bir bire bağlanır. Böylece ses dalgası gözenekler arasındaki bağlantı üzerinden malzeme içerisinde yayılır. Ses dalgası yayılma hareketi esnasındaki viskoz ve ısıl etkiler ile sönümlenerek malzemenin yutum performansını arttırmıştır.

Şekil 4.6 farklı delik yapıları olan köpüklerin ses yutum katsayısı değişim eğilimlerini göstermektedir. Delik delme işleminin, kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin ses yutum katsayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülebilir. 100 ve 315 Hz arasındaki frekans aralığında, 1,2 ve 3. tiplerinin yutum katsayıları 0,2'den azdır. 500 ila 1600 Hz frekans aralığında, tüm köpüklerin ses yutum katsayıları ilk önce artar ve daha sonra 3150 Hz'e kadar frekans arttıkça azalır. 3150 ile 6300 Hz arasında tekrar artarak 2. pik noktasına ulaşır. 2. ve 3. Tip Al köpükler bu frekans aralığında birbirine yakın yutum performansı

göstermekle birlikte. 2.tip Al köpük numuneler 1600 ile 6300 frekans aralığında ses yutumu için uygundur. Bununla birlikte, üç tip için de düşük ses yutum özelliğinden dolayı <315 Hz frekans aralığında akustik uygulama için uygun değildir.

Al köpük üzerinde yapılan delik delme işlemleri (Tip 2 ve 3) 1250 Hz ve üzerindeki yüksek frekanslarda malzemenin ses yutum özelliğini önemli ölçüde geliştirdiği ancak 1250 Hz altındaki orta ve düşük frekanslarda ise mevcut ses yutum performansını kısmen azalttığı görülmüştür. Altta verilen grafik, sırasıyla 1. 2. ve 3. tip numuneler için ölçülen verileri karşılaştıran frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişimini göstermektedir (Şelil 4.6).



Şekil 4.6. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişmi

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi delik delme işlemi 1250 Hz'den sonra etkili olur ve bu frekanstan sonra ses yutum katsayıları 0,7'nin üzerinde hızla artmıştır. Delik delme 1250-2000 Hz frekans aralığında çok iyi ses yutum katsayısı değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuçlar delik delme işleminin ses yutumunda ek avantajlar sağladığını göstermiştir.

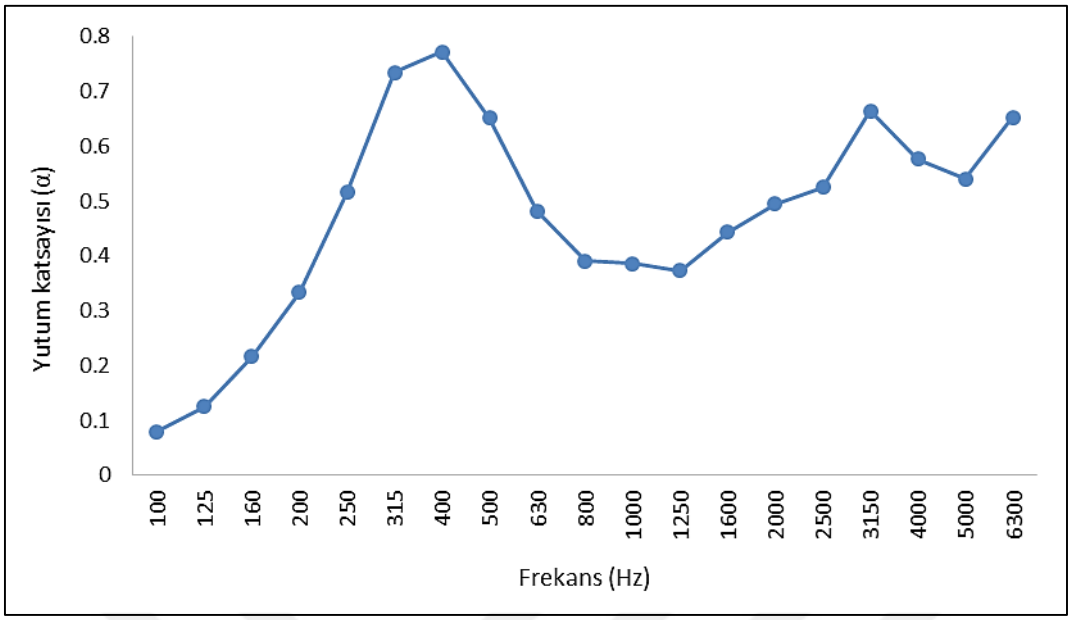
Yukarıda sunulan deneysel sonuçlar, açık bir şekilde, Al köpüğün ses yutum katsayılarının delik delme yoluyla önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslarda ses yutum katsayısının iyi olmaması hava akış direncinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kapalı gözenekli Al köpük üzerinde delik delme işlemi yapılarak,

gözenekler arasındaki bağlantı kurulup hava akış direnci azaltılmış ve ses dalgasının köpük içerisinde daha rahat yayılması sağlanmıştır. Böylece 1250 Hz ve üzeri frekanslarda yutum performansı artmıştır.

Al köpükler sert olduklarından yüksek sönümleme kapasitesine ve doğal titreşim frekanslarına (rezonans) sahiptirler. Bu nedenle, metalik köpüklerde ses yutumu temel olarak viskoz kayıplar; gözenek kanallarındaki ve gözeneklerdeki hava, ısıl elastik sönümleme, Helmholtz tipi rezonatörler mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, viskoz ve ısıl etkiler mevcut köpüklerin 1000 Hz'e kadar olan ses yutum kapasitesini arttırmada etkilidir. Yüksek frekans seviyelerinde ısıl etkilerin baskın olması beklenmektedir. Yüksek ısıl elastik sönümlemeye neden olan gözenek duvar yüzeylerindeki kırıklar Al köpüklerin ses yutum katsayısını artmasına katkı sağlamıştır (Bkz. Resim 3.14). Ses dalgası ezilmiş ve kırık gözenekler tarafından kısmen yansıtılır ve yutulur ve açılmış gözenek duvarlarında ısıl elastik sönümleme nedeniyle yüksek ses yutum katsayısına katkı sağladığı düşünülmüştür.

Dördüncü tip (tip 4) deney numunesi üç katmandan oluşmaktadır. İlk katman, deliksiz kapalı gözenekli alüminyum köpüktür. İkinci tabaka 20 mm kalınlıktaki hava boşluğudur. Üçüncü katman, birinci tip gibi (1. tip) kapalı gözenekli alüminyum köpükten oluşmaktadır. Tip 4 köpük deney numunesinin ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.7'de görülmektedir.

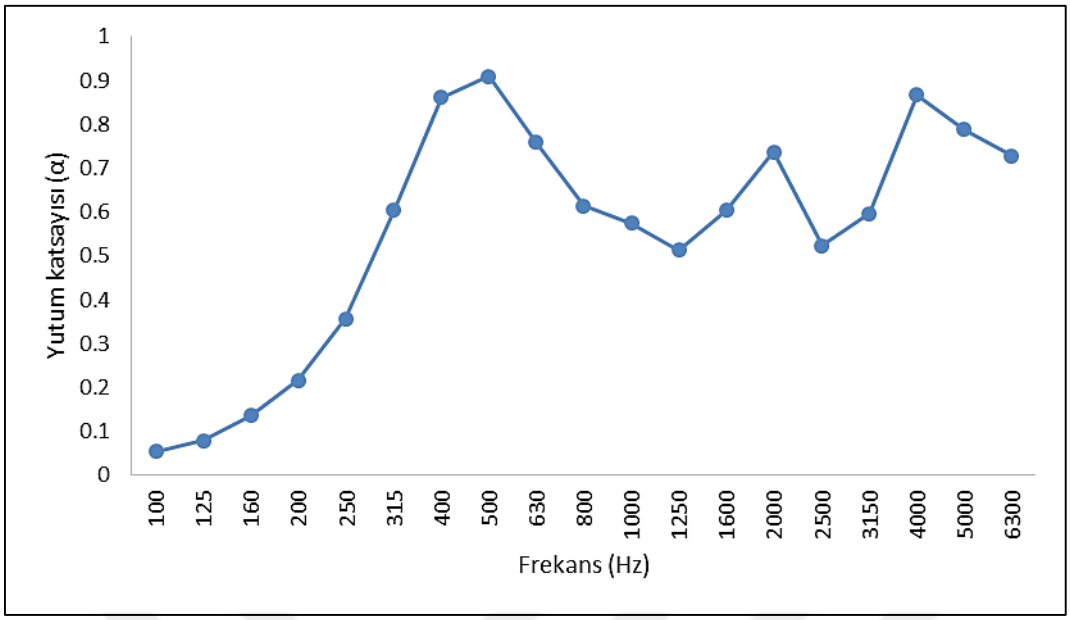
Tip 4 için 100 Hz ile 400 Hz arasında ses yutum katsayısı frekansa bağlı olarak artmış ve en yüksek ses yutum katsayısı 400 Hz'de 0,77 olarak ölçülmüştür. Daha sonra 400 ile 1250 Hz frekans aralığında önce azalan, daha sonra tekrar atarak 3150 Hz'de 0,67 ve 6300 Hz'de 0,65 olan iki maksimum yutum katsayısı değerlerine ulaşan dalgalanma hareketi göstermiştir. 4.tip Al köpük numuneler 315 ile 500 frekans aralığında ses yutumu için uygun gözükse de çalışılan frekans bandına göre 2500 ve 6300 frekans aralığında kullanılabilir.



Şekil 4.7. 4. Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği

Beşinci (5.) tip deney numunesi üç katmandan oluşmaktadır. İlk katman, 10 mm delikli (Al köpük kalınlığının yarısı) kapalı gözenekli alüminyum köpüktür. İkinci tabaka 20 mm kalınlıktaki hava boşluğudur. Üçüncü katman, birinci tip gibi (1. tip) kapalı gözenekli alüminyum köpükten oluşmaktadır.

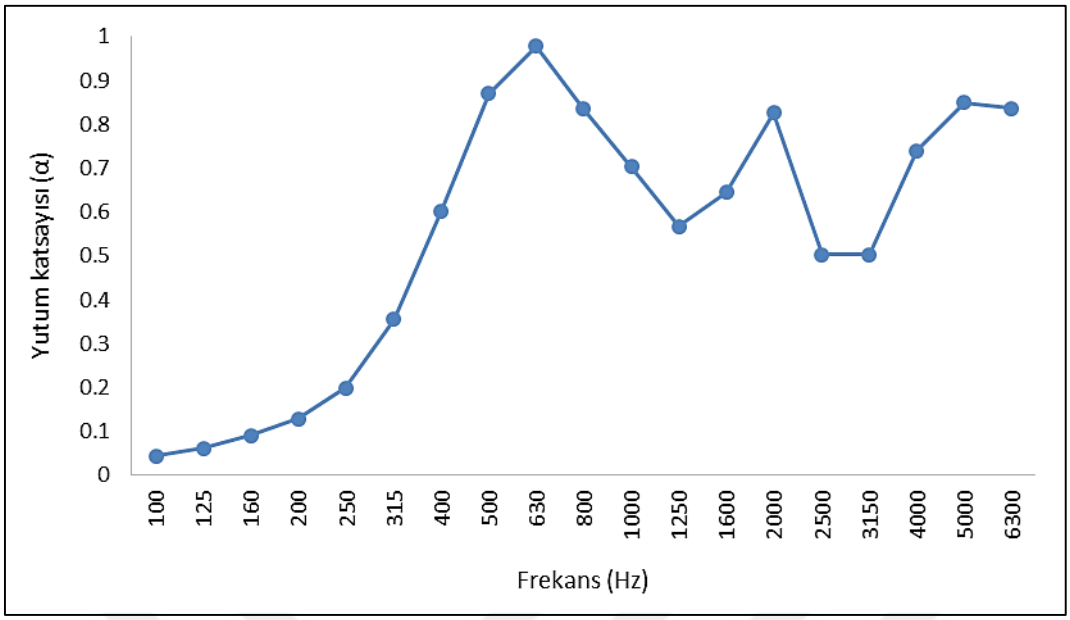
Beşinci (5) tip köpük deney numunesinin ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.8'de görülmektedir. Tip 5 için 100 Hz ile 500 Hz arasında ses yutum katsayısı frekansa bağlı olarak artmış ve en yüksek yutum katsayısı 500 Hz'de 0,91 olarak ölçülmüştür. Daha sonra 500 ile 1250 frekans aralığında önce azalan, 2000 Hz'de 0,74 ile ikinci pik ve 4000 Hz'de 0,87 ile üçüncü pik noktası değerlerine ulaşan dalgalanma hareketi göstermiştir. 5.tip Al köpük nuumuler 400 ile 630 Hz ve 3150 ile 6300 Hz frekans aralığında ses yutumu için uygundur.



Şekil 4.8. 5.Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği

Altıncı (6.) tip deney numunesi üç katmandan oluşmaktadır. İlk katman, 20 mm delikli (kalınlık boyunca) kapalı gözenekli alüminyum köpüktür. İkinci tabaka 20 mm kalınlıktaki hava boşluğudur. Üçüncü katman, birinci tip gibi (1. tip) kapalı gözenekli alüminyum köpükten oluşmaktadır.

Altıncı (6.) tip köpük deney numunesinin ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.9'da görülmektedir. Tip 6'nın ses yutum katsayısı frekansa bağlı olarak 100 Hz ile 630 Hz arasında artmıştır. Ses yutum katsayısı 630 ile 1250 Hz frekans aralığında önce azalan, 2000 Hz'de 0,83 ile ikinci pik ve 5000 Hz'de 0,87 ile üçüncü pik noktası değerlerine ulaşan dalgalanma hareketi göstermiştir. Tip 6 için en yüksek ses yutum katsayısı 630 Hz'de 0,98 olarak ölçülmüştür. 6.tip Al köpük numuneler 500 ile 1000 Hz ve 4000 ile 6300 Hz frekans aralığında ses yutumu için uygundur.

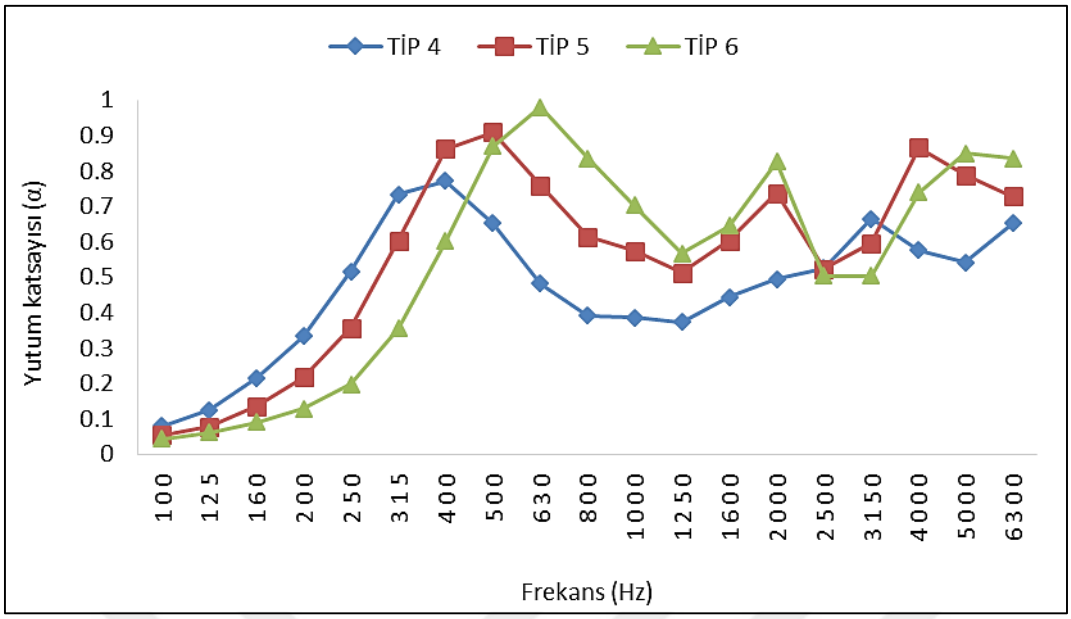


Şekil 4.9. 6.Tip Al köpüğün ses yutum katsayısının değişim grafiği

Bu çalışmada, ses yutum özelliğini optimize etmek için 1., 2. ve 3. tip Al köpük numunelere hava boşlukları uygulanmış ve 3 katmanlı bir yapı olarak tip 4,5 ve 6. tip Al köpük deney numuneleri elde edilmiştir. Şekil 4.10'da 3 katmanlı yapıların (Tip 4, 5 ve 6) köpük numunesinin ses yutum katsayısı ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği görülmektedir.

Hava boşluklarının, köpüklerin ses yutum katsayısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülebilir. 4, 5 ve 6. tipler için ses yutum katsayısının maksimum tepe değerlerine karşılık gelen frekanslar, hava boşluğu uygulanan üç katmanlı yapı için daha düşük frekanslara doğru kaymıştır. Genel olarak, 4, 5 ve 6. tipler için ses yutum davranışı 315 Hz- 630 Hz düşük frekans aralığında daha iyidir.

Köpüğün arkasındaki hava boşluğunun, orta frekansta ses yutum katsayısını önemli ölçüde arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

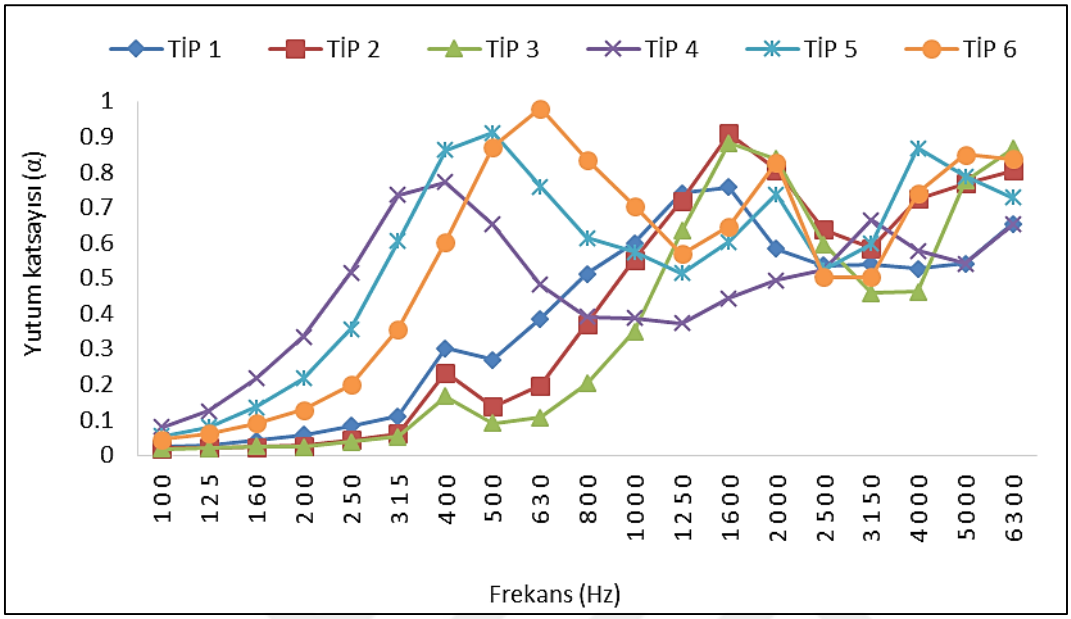


Şekil 4.10. 3. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim karşılaştırması

Delik delme işleminin, kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin ses yutum katsayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. 1. Tip (Deliksiz) köpük numuneye göre 2.tip ve 3. Tip köpük numuneler için delik delme işlemi 1600 Hz ile 6300 Hz arasında ses yutum performansını arttırmıştır. Delik delme işlemi uygulanan 2. Tip ve 3. tip köpük numuneler için maksimum ses yutum katsayıları 1600 Hz frekansta sırasıyla 0,91 ve 0,88 ile birbirine yakın değerler olarak ölçülmüştür.

Hava boşluğu destekli üç katmanlı Al köpük numuneler (Tip 4-6), 100 Hz ile 1000 Hz arasındaki düşük frekanslarda malzemenin ses yutum özelliğini önemli ölçüde geliştirdiği ancak 1000 Hz ile 1600 Hz frekans aralığında ise mevcut ses yutum performansını kısmen azalttığı görülmüştür. 1600 Hz ile 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayılarının dalgalanmaları birbirinden farklı olmakla birlikte genel olarak bu frekans aralığında dalgalanan bir artış eğilimi göstermiştir. Hava boşluğu destekli üç katmanlı Al köpük numuneler (Tip 4-6) 100 Hz ile 630 Hz arasında sürekli artan yutum katsayısı değişimi göstermiş ve maksimum yutum katsayısı değerlerini 400 Hz ile 800 Hz düşük frekans bandına kaydırmıştır. Tip 4, 5 ve 6 için maksimum ses yutum katsayısı değerleri sırasıyla 400 Hz frekansta 0,77, 500 Hz'de 0,91 ve 630 Hz'de 0,98 olarak ölçülmüştür. Tip 6, bütün frekans bantları aralığında en yüksek ses yutum katsayısı değerine ulaşan Al köpük numune olmuştur. Şekil 4.11 (Tip 1-6), katmansız, kalınlığa göre farklı oranlarda delik

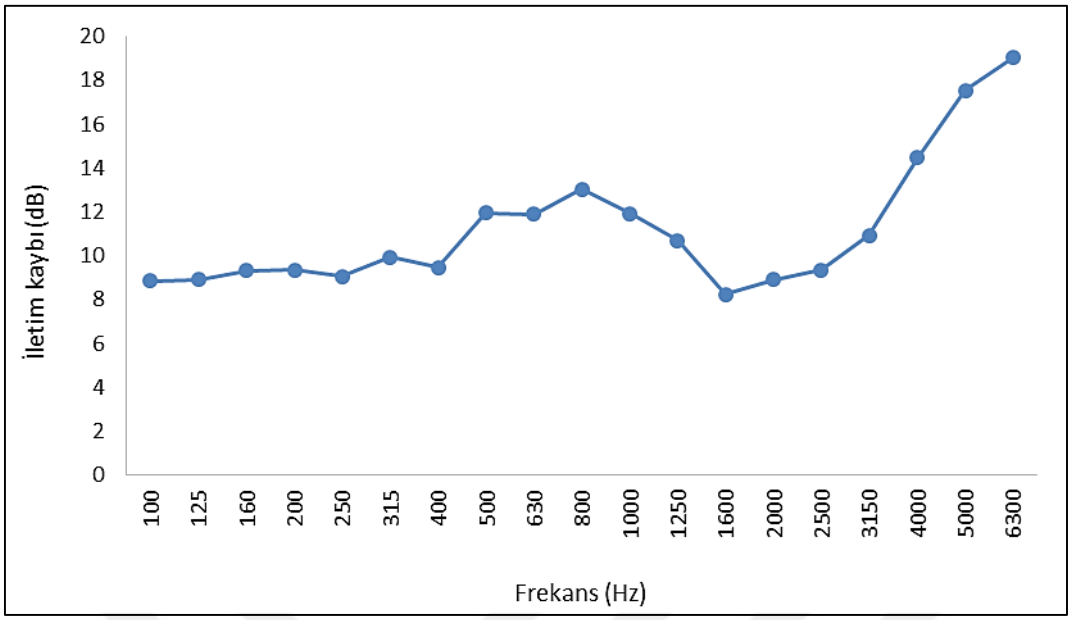
delinmiş ve hava boşluğu destekli katmanlı bir yapıya sahip köpük numunelerin frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim eğilimlerini göstermektedir.



Şekil 4.11. Altı farklı yapıdaki Al köpüğün ses yutum katsayısı değişimi karşılaştırması

4.3. Al Köpüğün Ses İletim Kaybı

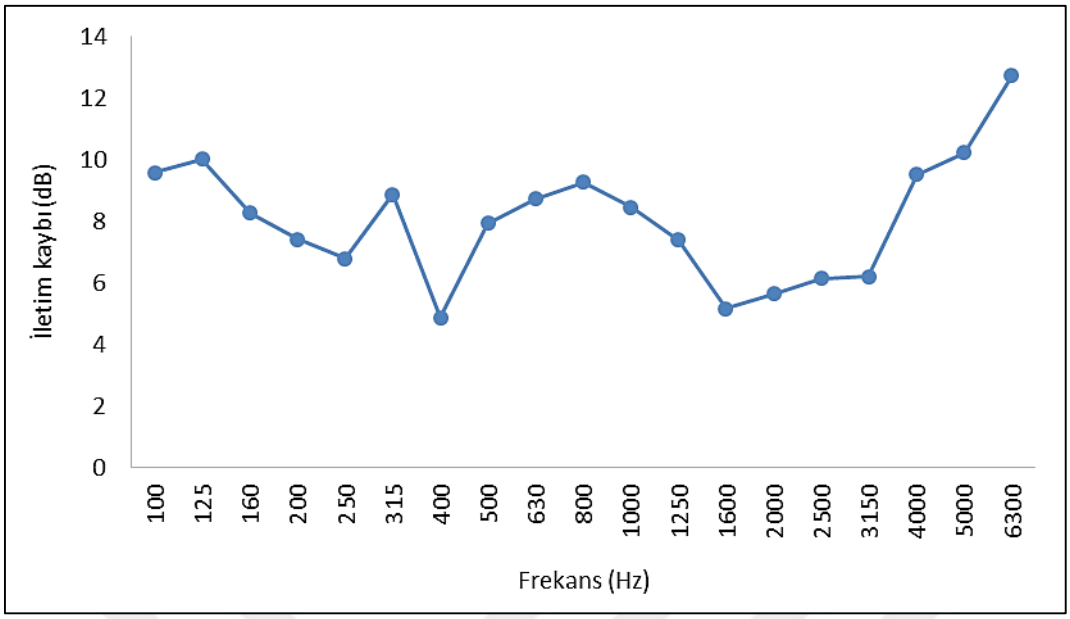
Tip 1 (Delik delinmemiş) Al köpüğün ses iletim kaybı (TL) ölçümüne ait frekansa bağlı TL değişim grafiği Şekil 4.12'de görülmektedir. 100 Hz ile 400 Hz arasında TL değerleri nispeten stabil değerler almış, 800 Hz frekansında ilk maksimum TL değeri olan 13.4 dB değerine ulaşmıştır. Daha sonra 1600 Hz rezonans frekansın da bütün frekans bandının en düşük TL değeri olan 8,25 dB'e kadar azalmıştır. 1600 Hz ile 6300 Hz arasında artış eğilimi göstererek 6300 Hz'de maksimum TL değeri olan 19,03 dB değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.12. 1. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi

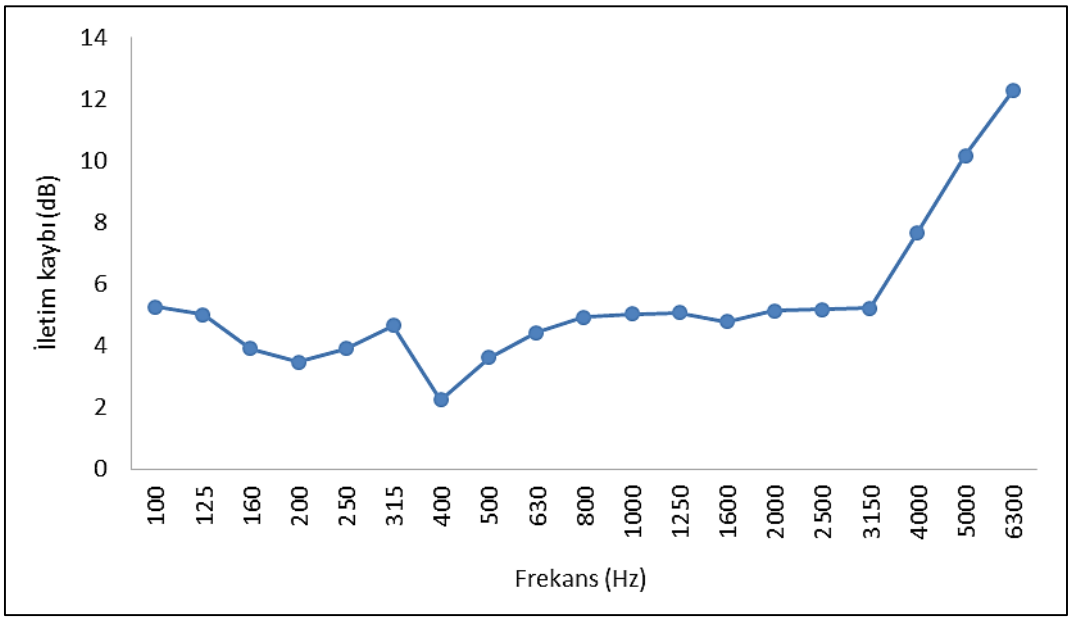
Tip 2 Al köpük deney numunesi kalınlığının yarısı olacak ölçüde (10 mm) 2mm çapında % 2 oranında delikler delinmiştir. Tip 2 (2. Tip) köpük numunesinin TL ölçümüne ait frekansa bağlı TL değişim grafiği Şekil 4.13'de görülmektedir.

100 Hz ile 125 Hz arasında TL 10,01 dB olmuştur. 125 Hz ile 250 Hz arasında azalarak 6,77 dB'e düşmüştür. 250 Hz ile 400 Hz frekans aralığında ilk önce 315 Hz'de 8,86 dB'e artan daha sonra ilk rezonans frekansı olan 400 Hz'de en düşük TL değeri 4,87 dB'e azalmıştır. 400 Hz ile 1600 Hz arasında ilk önce 800 Hz frekansında 9,25 dB'e kadar artan daha sonra kritik frekans olarak ifade edilen olan 1600 Hz'deki rezonans çukurunda bütün frekans bandının en düşük TL değeri olan 5,16 dB'e azalan dalgalanma eğilimi göstermiştir. 1600 Hz ile 6300 Hz arasında artış eğilimi göstererek 6300 Hz'de maksimum TL değeri olan 12,72 değerine ulaşmıştır.



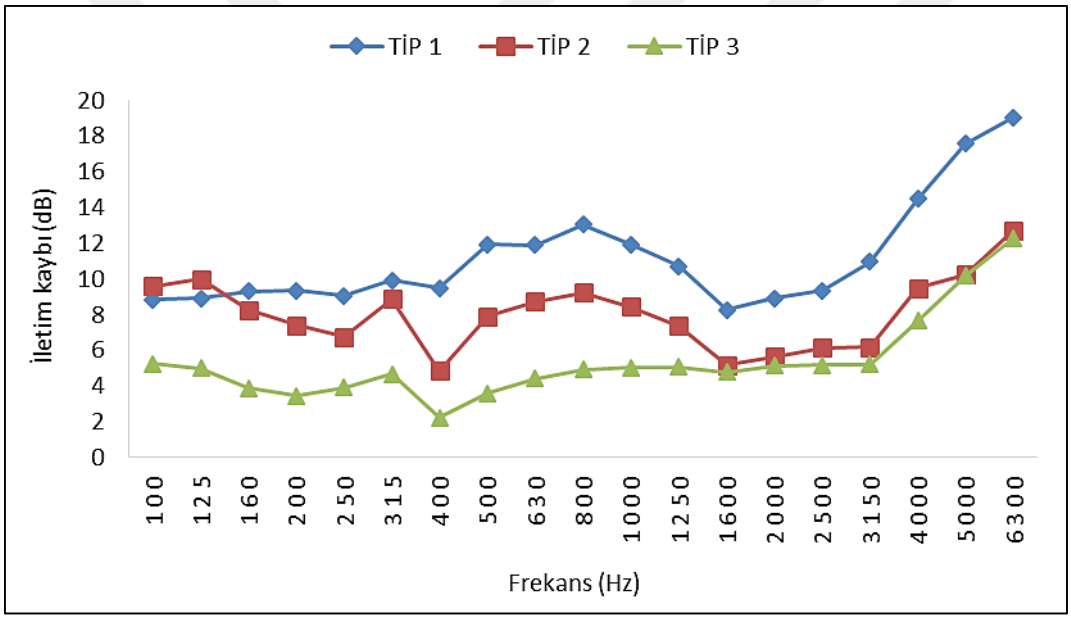
Şekil 4.13. 2. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi

Tip 3 Al köpük deney numunesi numune kalınlığı kadar olacak ölçüde (20 mm) 2 mm çaplı % 2 oranında delikler delinmiştir. Tip 3 köpük numunesinin TL ölçümüne ait frekansa bağlı TL değişim grafiği Şekil 4.14'de görülmektedir. 100 Hz ile 200 Hz arasında TL ilk önce 3,46 dB'e azalmış daha sonra 315 Hz'de 4,66 dB'e artmıştır. Rezonans frekansı olan 400 Hz'de en düşük TL değeri 2,23 dB'e azalmıştır. Daha sonra 400 Hz ile 6300 Hz arasında sürekli artış eğilimi gösteren TL 6300 Hz'de 12,28 dB ile maksimum TL değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.14. 3. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi

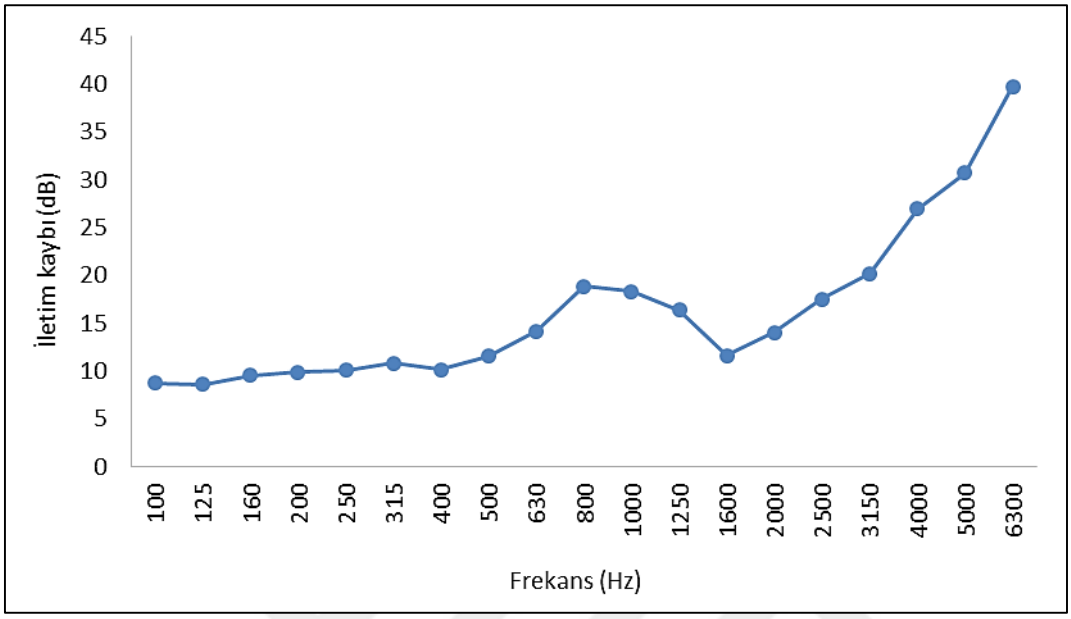
Al köpük üzerinde yapılan delik delme işlemleri Tip 1'e göre Tip 2 ve Tip 3 köpüklerde 400 Hz rezonans frekansındaki en düşük TL değerlerini sırasıyla 9,48 dB'den 4,87 ve 2,23 dB değerlerine düşürmüştür. Maksimum TL değerlerinin görüldüğü 6300 Hz'deki 19,03 dB TL değerlerini ise Tip 2 ve Tip 3 için 12,72 ve 12,28 dB değerlerine düşürmüştür. Bu sonuçlar kapalı gözenekli köpük üzerinde uygulanan delik delme işlemlerinin köpüğün ses yalıtım performansını (TL) neredeyse bütün frekans aralığında azalttığı göstermiştir. Bunun nedeni delik delme işlemi ses dalgaları malzeme içerisinde yayılmasını kolaylaştırmış ve ses geçişi yanı TL değerini arttırmasıdır. Bu durum aynı zamanda hava akış direncini azalması anlamına gelmektedir. Altta verilen grafik, sırasıyla 1. 2. ve 3. Tip Al köpüklerin frekansa bağlı TL değişimlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi karşılaştırması

Dördüncü (4) tip deney numunesi üç katmandan oluşmaktadır. İlk katman, deliksiz kapalı gözenekli alüminyum köpüktür. İkinci tabaka 20 mm kalınlıktaki hava boşluğudur. Üçüncü katman, birinci tip gibi (1. tip) kapalı gözenekli alüminyum köpükten oluşmaktadır. Tip 4 için TL değerleri 100 Hz ile 800 Hz arasında frekansa bağlı olarak artmış ve TL değeri 800 Hz'de 18,84 dB olarak ölçülmüştür. Daha sonra 800 ile 1600 Hz arasında kritik frekansa kadar azalarak bu frekansta 11,61 dB olarak ölçülmüştür. Daha sonra doğrusal bir şekilde tekrar artarak 6300 Hz'de 39,74 dB ile maksimum TL değerine ulaşmıştır.

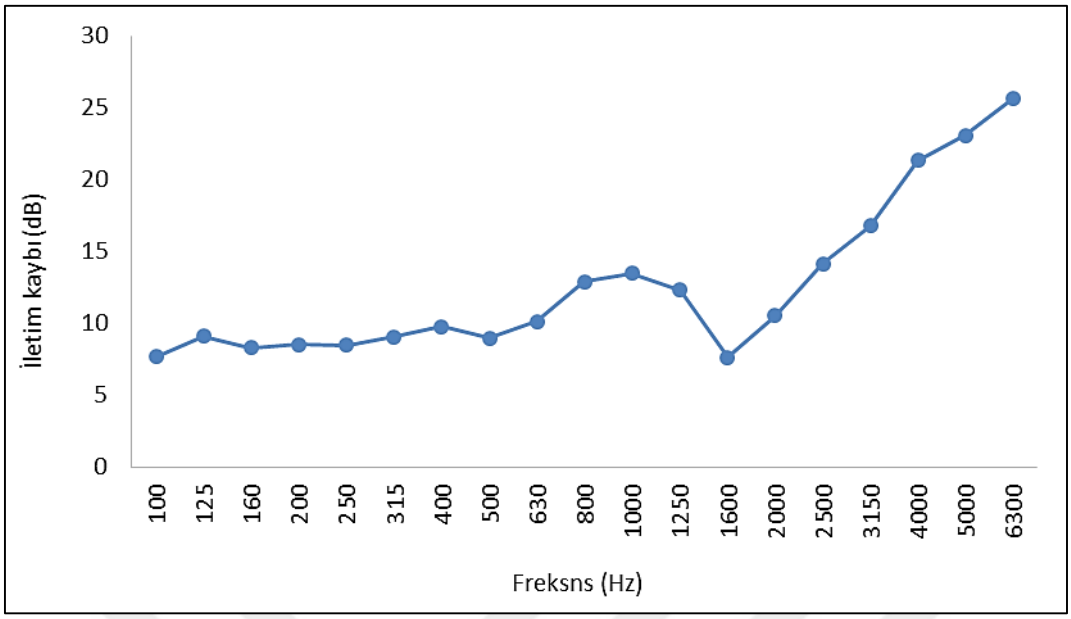
Dördüncü (4,) tip köpük deney numunesinin TL ölçümüne ait deney sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16. 4. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi

Beşinci tip (tip 5) deney numunesi üç katmandan oluşmaktadır. İlk katman, 10 mm derinlikte delikli (kalınlığın yarısı) kapalı gözenekli alüminyum köpüktür. İkinci tabaka 20 mm kalınlıktaki hava boşluğudur. Üçüncü katman, birinci tip (tip 1) kapalı gözenekli alüminyum köpükten oluşmaktadır.

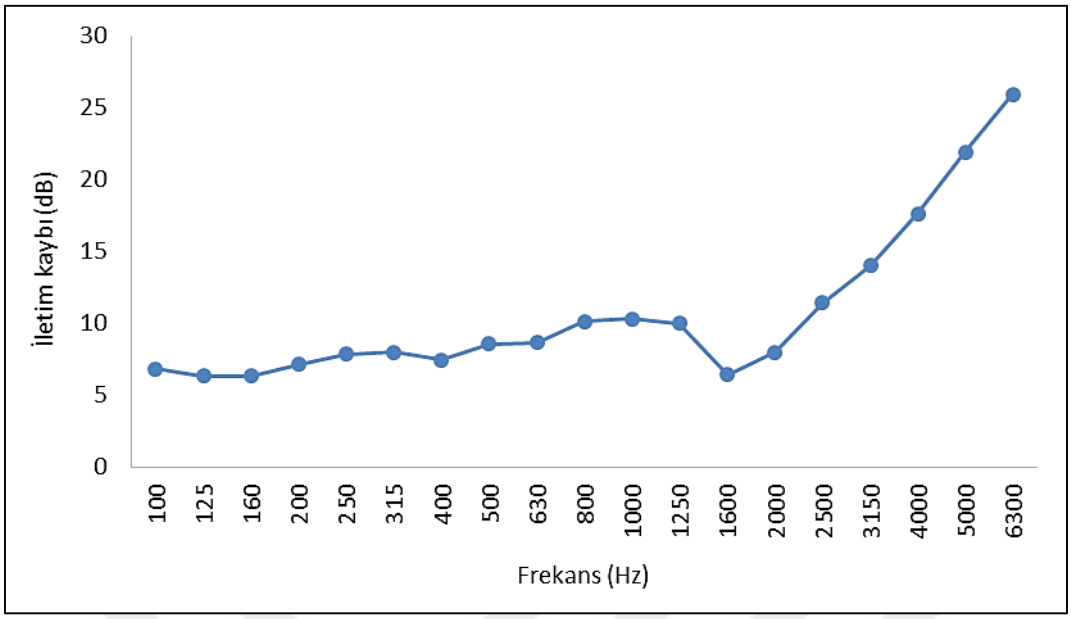
Tip 5 için TL değerleri 100 Hz ile 1000 Hz arasında frekansa bağlı olarak artmış ve 1000 Hz'de 13,46 dB olarak ölçülmüştür. Daha sonra 1000 ile 1600 Hz arasında kritik frekansa kadar azalarak bu frekansta en düşük TL değeri olan 7,4 dB olarak ölçülmüştür. Daha sonra doğrusal bir şekilde tekrar atarak 6300 Hz'de 25,65 dB ile maksimum TL değerine ulaşmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. 5. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi

Altıncı (6.) tip deney numunesi üç katmandan oluşmaktadır. İlk katman, 20 mm delikli (kalınlık boyunca) kapalı gözenekli alüminyum köpüktür. İkinci tabaka 20 mm kalınlıktaki hava boşluğudur. Üçüncü katman, birinci tip gibi (1. tip) kapalı gözenekli alüminyum köpükten oluşmaktadır.

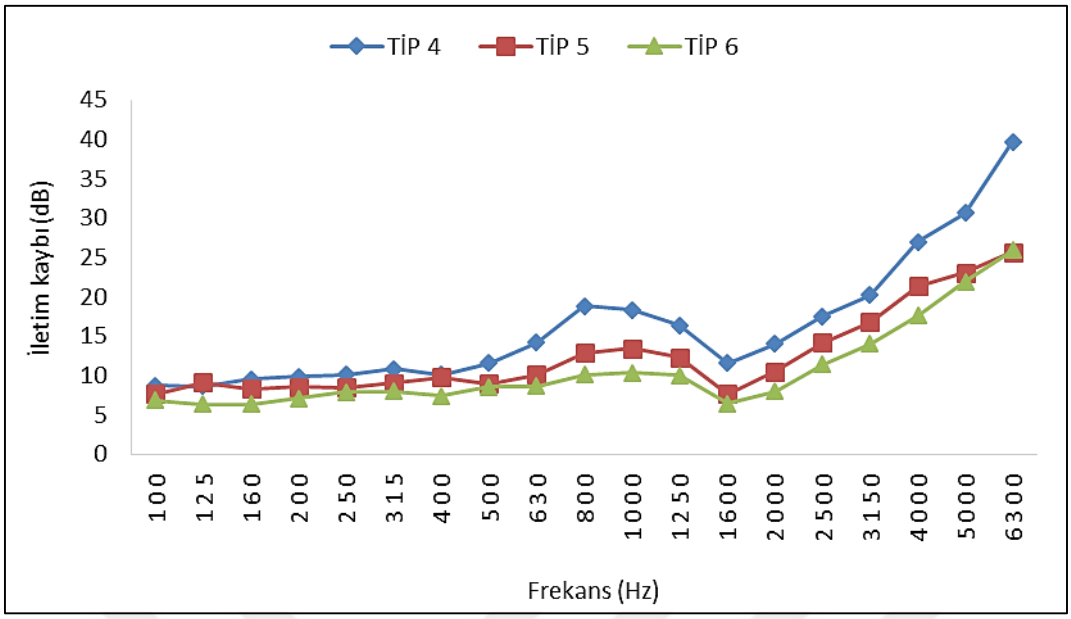
Tip 6 için 100 Hz ile 1250 Hz arasında TL frekansa bağlı olarak artmış ve TL değeri 1250 Hz'de 9,99 dB olarak ölçülmüştür. Daha sonra 1250 ile 1600 Hz arasında kritik frekansa kadar azalarak bu frekansta TL 7,4 dB olarak ölçülmüştür. Daha sonra doğrusal bir şekilde tekrar atarak 6300 Hz'de 25,95 dB ile maksimum TL değerine ulaşmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. 6. Tip Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi

Hava boşluklu üç katmanlı Al köpük numuneler (Tip 4-6), 200 Hz ile 6300 Hz arasındaki malzemenin ses yalıtım performansını önemli ölçüde arttırdığını belirlenmiştir. Tip 4, tip 5 ve tip 6 TL değişim grafiği birbirine benzemektedir. Bununla birlikte tip 5'in maksimum TL değerleri tip 4'e göre 39,74 dB'den 25,65 dB'e düşerek yaklaşık 15 dB azalmıştır. Bu durumda delik delme işlemi TL değerini azaltmıştır. Tip 6 köpük numunesi frekansa bağlı TL tip 4 ve tip 5'e benzemekte olup bütün frekans bandında en düşük TL değerleri elde edilmiştir. Sonuçlarından elde edilen frekansa bağlı ses yutum katsayısı değişim grafiği Şekil 4.19'da görülmektedir.

Tip 4-5 ve 6 için düşük frekanslarda ses dalgasının malzeme içerisindeki yayılımını malzemenin boyutları, yüzey yoğunluğu ve kullanılan malzemenin sertliği kontrol eder (Şekil 4.19). Malzemenin kütlesi ve sönümlemesi ise önemli değildir. Malzemelerin sertlikleri elastisite modülü ile dolayısıyla mukavemeti ve şekil değiştirmesi ile bağlantılıdır. Düşük frekans bölgesinde Al köpüğün sertliği, TL değerinin daha yüksek değerler almasını engellemiştir. Orta frekans bölgesinde ise ses geçiş kaybı malzemenin kütlesi etkili olmaktadır. Frekans yükselip rezonans bölgesine girdiğinde ise ses geçiş kaybını malzemenin sönümlemesi etkilemiştir.



Şekil 4.19. Üç farklı Al köpüğün frekansa bağlı ses iletim kaybı değişimi karşılaştırması

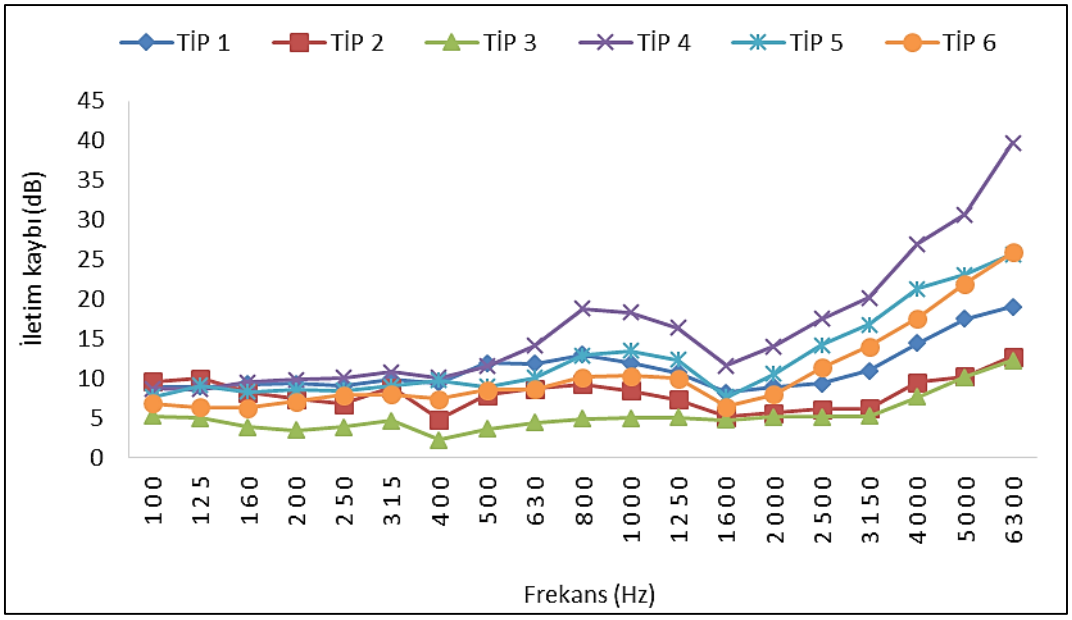
Al köpükte delik delme işleminin TL'nin maksimum tepe değeri üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Delik delinmemiş ve hava boşluğu bırakılmış Al köpüğün ses iletim kaybı (TL). Diğer tiplerdeki köpüklerden daha iyidir.

Hava boşluğu destekli üç katmanlı Al köpük numuneler için TL (Tip1-6) 400 Hz ile 1600 Hz arasında ilk önce sonra artan sonra 1600 Hz kritik fransta oluşan rezonans çukurunda azalmıştır. 1600 Hz ile 6300 Hz arasında sürekli artan TL değişimi göstermiş ve maksimum TL değerlerini 6300 Hz yüksek frekans bandına ulaşmıştır. Tip (1-6) için maksimum TL değerleri 6300 Hz frekansta sırasıyla 19,03 dB 12,72 dB 12,28 dB 39,74 dB 25,65 dB 25,95 dB olarak ölçülmüştür**.**

Şekil 4.20 (Tip 1-6)'da 100 Hz ile 315 Hz frekans aralığında sertlik kontrollü bölgede 5 dB ile 10 dB arasında değişen birbirine benzeyen stabil bir değişim eğilimi oluşmuştur. Tip 2 ve tip3 için 400 Hz frekansta ses dalgasının frekansı Al köpük malzemenin doğal titreşim frekansı ile çakıştığında rezonans oluşmuş ve bütün Al köpük numuneleri arasında TL 4,87 dB ve 2,23 dB ile en düşük değerleri almıştır. 400 Hz ile 1600 Hz frekans aralığındaki kütle kontrollü bölgede 3. Tip haricindeki bütün Al köpük malzeme tipleri için TL değerleri önce artmış daha sonra 1600 Hz de kritik frekanta frekans çakışması nedeniyle azalmıştır. Daha sonra 16000 Hz ile 6300 Hz frekans aralığında bütün Al köpük malzeme tipleri için TL değerleri artmış ve 6300 Hz frekansında en yüksek değerleri almıştır. Tip 4,

bütün frekans bantları aralığında en iyi ses yalıtım performansı gösteren Al köpük numune olmuştur.

Şekil 4.20 (Tip 1-6), katmansız, kalınlığa göre farklı oranlarda delik delinmiş ve hava boşluğu destekli katmanlı bir yapıya sahip Al köpük numunelerin frekansa bağlı TL değişim eğilimlerini göstermektedir.



Şekil 4.20. Altı farklı yapıdaki Al köpüğünses iletim kaybı değişim karşılaştırması

Aşağıda bütün test numunlerinin akustik performansı ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmiştir.

Tip 1 Al köpüğün gözenekleri kapalıdır ve birbirleriyle bağlantılı değildir. Gelen ses dalgasının çoğu yansıtılır ve küçük bir orandaki ses dalgası mikro gözenekler ve çatlaklar tarafından yutulur ve iletilir. Bu nedenle, herhangi bir ikincil işlem yapılmayan kapalı gözenekli Al köpükler, orta ve yüksek frekans aralığında diğer tip numulere göre daha düşük ses yutumu davranışı sergilemiştir. Bunula birlikte Tip 1 Al köpük bütün frekans aralığında katmanlı yapı haricinde diğer tip numunelere göre daha iyi ses yalıtım performansı göstermiştir.

Tip 2 Al köpüğe gelen ses dalgası gözenek duvarlarından yarım boy delik delinmiş gözeneklere girer. Gözenek duvarına çarparak dağılan ses dalgasının bir kısmı doğrudan yansır ve çoğu duvardan geçerek yarım deliklere ulaşır. Yarı deliklere ulaşan ses dalgası,

gözenekleri çevreleyen hava ile sürtünerek veya kırık gözenek duvarlarının titreşmesine neden olarak yayılma sürecinde ses enerjisinin bir kısmı yutulur ve tüketilir. Ayrıca, kapalı gözenekler nedeniyle ses dalgası yarı deliklerden yansır ve oldukça küçük bir kısım iletilir. Bu nedenle, yarı delikli kapalı gözenekli Al köpükler, yüksek frekansta iyi ses yutum özelliği gösterirken tip 1'e göre bütün frekans aralığında daha düşük ses yalıtım performansı göstermiştir.

Tip 3 için, delik delinerek açılmış gözeneklere ve gözenek duvarına gelen ses dalgasının dağılarak yayılma süreci tip 2'de olduğu gibi gerçekleşir. Ses dalgasının sadece bir kısmı yansıtılır. Deliklerden geçerek dağılan ses dalgasının büyük bir kısmı iletilir ve ses enerjisinin bir kısmı yukarıda tarif edildiği gibi sürtünme ile tüketilir. Bu nedenle, malzeme kalınlığı boyunca delik delinmiş kapalı gözenekli alüminyum köpükler, orta ve yüksek frekans aralığında çok iyi ses yutum davranışı sergilerken tip1 ve tip 2'ye göre bütün frekans aralığında daha düşük ses yalıtım özelliği göstermiştir. Bu durum esas olarak ses dalgasının gözenek yoluyla iletilmesinden kaynaklanmıştır.

Tip 4'de Al köpüğe gelen ses dalgasının bir kısmı yansıtılır ve aktarılır. Tip 4 gelen ve yansıyan ses dalgalarının üst üste gelmesinden dolayı yüksek frekansta farklı ses yutum tepe noktalarını göstermiştir (Bkz. Şekil 4.7). Yansıyan ve gelen ses dalgası buluştuğunda parazit (dalgalanma) oluşmuştur. Tip 4 hava boşluğuyla desteklendiği için Al köpüklerin ses yutum katsayısı artarak düşük frekans bölgesine kaymıştır. Hava boşluğuyla destekli Tip 4 bütün test numuneleri içerisinde en iyi ses yalıtım performası göstermiştir (Bkz. Şekil 4.20).

Tip 5 için, gelen ses dalgası her bir delik ve arkasındaki boşluk hacmine ulaşarak yansıtılır ve aktarılır. Ayrıca gelen ve yansıyan ses dalgalarının üst üste gelmesinden dolayı yüksek frekansta maksimum ses yutum katsayısında dalgalanmalar görülmüştür. Tip 5'deki köpüğün ses yutum katsayısı hem hava boşluğu hemde deliklerin etkisiyle tip 4'e göre daha yüksek ve düşük frekans bölgesine kaymıştır Bununla birlikte, tip 5 deliklerin etkisiyle bütün frekans aralığında düşük ses yalıtım özelliği sergilemiştir.

Tip 6 için, gelen ses dalgası delikli gözenekler ve hava boşlukları içerisinde yansıtılır ve aktarılır. Ayrıca ilk katmandan gelen ses dalgası her bir delik ve arkasındaki karşılık gelen boşluk hacmine ulaşır. Bu hacim; belirli frekanslarda ses yutumu için kullanılan bir

tarafında genişçe bir delik (hava boşluğu) bulunan Helmholtz rezonatörüne eşdeğerdir. Al köpük gözeneklerindeki bu yapılar ses enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek azalmasını sağlamıştır. Son olarak, üç katmanlı yapılarda ses dalgasının yayılması, deliksiz, gözenekler arası bağlantının olmadığı 3. katmanı oluşturan kapalı gözenekli köpükler tarafından durdurulur.

Al köpüklerin rezonans frekansının ses yutum davranışı üzerinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Genel olarak, Al köpüğün doğal frekensı ile gelen ses dalgasının frekansı çakıştığında ses dalgası genliği artmış ve Al gözeneklerde rezonas oluşmuştur. Bu durumda, gözenek bağlantı kanalında ve gözeneklerde havanın titreşim hızı maksimum seviyesine ulaşır ve ses enerjisi en çok sürtünme nedeniyle tüketilir. Rezonans oluştuğunda titreşim hızı ve bu durumun doğal bir sonucu olarak ses yutum katsayısı maksimum seviyeye ulaşır. Bu durum bütün tiplerdeki Al köpük numuneler için geçerlidir. Ayrıca havanın titreşim hızının artması çoklu pik noktalarını ortaya çıkarmıştır. Maksimum ses yutum katsayısının görüldüğü frekanslardaki dalgalanmalar (pik noktaları) rezonans ve anti rezonans freknslarından kaynaklanmıştır.

Tip 5 tip 6 birçok rezonatörden oluşur ve ses yutum prensibi tek bir rezonatör ile aynıdır. Gelen ses dalgasının frekansı kademeli olarak rezonans frekansından sapmasıyla, titreşim hızı ve ses enerjisi tüketimi dolayısı ile ses yutma katsayısı azalmıştır. Ayrıca, tip 5 ve 6 gelen ve yansıyanses dalgalarının üst üste gelmesinden dolayı yüksek frekansta farklı ses yutum tepe noktalarını göstermektedir. Yansıyan ve gelen ses dalgası buluştuğunda parazit (dalgalanma) oluşmuştur.

Sonuç olarak, tip4, tip5 ve tip6 tipi düşük frekansta iyi ses yutum davranışını göstermiştir. Yukarıda açıklandığı gibi, farklı makro yapıya (delik yapısına) sahip kapalı gözenekli alüminyum köpükler farklı ses yalıtımı özellikleri sergiler. Tip 1,4,5,6 orta ve yüksek frekanslarda 15 dB'in üzerine çıkarak tip 2 ve 3 den daha iyi bir yalıtım performansı göstermiştir. Bütün deney numuneleri arasında tip 4 orta frekans bandında 20 dB ve yüksek frekans bandında 30 dB'in üzerine çıkarak 6300 Hz'de yaklaşık 40 dB değerine ulaşarak iyi bir yalıtım performansı göstermiştir. Bu durum malzeme içerinde yayılan ses dalgalarının gözenekler arasındaki bağlantıların çok az olduğu kapalı gözenekler tarafından engellenerek ses iletiminin azaltılmasından kaynaklanmıştır.

Tip 4 çok iyi ses yalıtım özelliğine sahip olsa da, ses yutum özelliği son derece zayıftır, tip 3 ise, iyi bir ses yutum kapasitesine sahiptir ancak daha düşük ses yalıtımı özelliği göstermiştir. Hem ses yutumu hem de ses yalıtımı özelliklerinden dolayı, tip 2, 2500-6400 Hz frekans aralığında tip 1 ve tip 3 türlerinden daha iyidir. Al köpük kalınlığının yarısı olacak şekilde delik delinmiş kapalı gözenekli Al köpük, yüksek frekans aralığında iyi ses yutum ve ses yalıtımı performanslarına sahiptir.

Farklı frekans aralıklarındaki tek katmanlı deliksiz Al esaslı köpüğün TL'si farklı mekanizmalar tarafından kontrol edilir ve düşük frekanslardaki TL, yüksek frekanslardaki TL'den daha küçüktür. Deney sonuçlarına göre katmanlı deliksiz ve hava destekli katmanlı Al köpük numuneler en iyi ses yalıtımı performansını göstermiştir.

Bütün Al köpük deney numunelerinde yüksek frekanslarda düşük frekanslara göre daha iyi ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı değerleri elde edilmiştir. Hava gibi ortamlarda ses dalgalar halinde yayılır. Titreşimlerin bir devri sırasında sesin aldığı yola dalga boyu denir. Küçük dalga boyu, dalga sayısını arttırır. Yüksek frekans dalga boyları, düşük frekanslı dalga boylarına göre daha küçüktür ve ses dalgaları yüksek frekansta yayılmasının daha kolay zayıflatılır veya engellenir. Böylece yüksek frekanslarda daha fazla dalga yakalanarak daha yüksek bir sönümleme elde edilir.

Al köpüğün ses yutum özelliğini arttırma için kapalı gözenekli yapının yüzey cildi tel erozyon kullanılarak açılması ile gözenek yüzeyinde mikrometre boyutlu çatlak ve kırıklar oluşmuştur (Bkz. Resim 3.14). Çatlaklar Al köpüğün kapalı gözeneklerinin birbirine bağlanmasını sağlamıştır. Ayrıca Al köpüğün ince gözenek duvar yapısı sayasinde, Helmholtz mikro delikli rezonatörler gibi davranmasına ve özellikle yüksek frekansta, Helmholtz rezonansı, gözenek duvarı titreşimi ve viskoz ve ısıl etkileşim nedeniyle iyi bir ses yutum performanı göstermiştir.

Ayrıca, köpüklerin arkasında boşluk bırakılması, ses yalıtım ve yutum performansında kayda değer bir şekilde arttırmıştır. Al köpüklerin ses yalıtım ve yutum özellikleri ağırlıklı olarak köpük gözenekliliğine, yüzey yapısının açık veya kapalı olmasına ve bu işlemlerden sonra köpük gözenek duvar malzemesinin özelliklerine bağlı olduğu gözlenmiştir.

4.4. Yalıtım Malzemelerinin Isıl ve Akustik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Yalıtım malzemelrinin ısıl ve akustik performansını, tek bir endeksle tanımlamak mümkün değildir. Bununla birlikte Al köpük ile bazı geleneksel ve sürdürülebilir malzemelerin farklı kalınlıkları göz önüne alınarak ısı, ses yalıtımı ve ses yutum özellikleri genel olarak değerlendirilmiştir. Ses iletim kaybı, ses yutum katsayısının karşılaştırılması için 500 Hz referans alınmıştır. Ayrıca maksimum ses iletim kaybı, ses yutum katsayısı ve darbe sesi yalıtımı indeksi (ΔL_w)'de malzemelerin ses yalıtım ve yutum performansının değerlendirlmesi için kullanılmıştır. Çizelge 4.2'de ki verilere göre yalıtım malzemelerinin ısıl ve akustik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Al köpük haricindeki incelenen bütün malzemelerin ısı iletim katsayısı değerleri 0,03-0,065 W/mK aralığında değişmekte olup ısı yalıtım malzesi olarak kullanılmaktadırlar. En düşük ısı iletim katsayısı değeri olan 0,03 W/mK ile genleştirilmiş poliüretan Çizelge 4.2'de verilen malzemeler arasında en iyi ısı yalıtım performansına sahip malzemedir. Tip 1 Al köpüğün ısı iletim katsayısı 1,2 W/mK olup diğer malzemelerden daha yüksektir.

Yalıtım malzemelerinin 500 Hz'de kalınlığına bağlı olarak ses yutum katsayısı 0,27-1 aralığında değişmektedir. Tip 1 Al köpüğün 500 Hz'deki ses yutum katsayısı diğer malzemelere göre en düşük değer olan 0,27 değerini almıştır. Tip 4 ve tip 6 Al köpükler ise 500 Hz'de ses yutum katsayısları sırasıyla 0,65 ve 0,83 olarak belirlenmiştir. Özellikle tip 6 Al köpüklerin ses yutum performansı cam yünü ve selüloz panel (α=1) haricindeki diğer malzemelerin ses yutum katsayısı değerlerinden daha iyidir. Ayrıca tip 6 Al köpük 630 Hz'de maksimum ses yutum katsayısı değeri olan 0,98'e ulaşmış ve neredeyse cam yünü ve selüloz panelin ses yutum performans değerini (α =1) yakalamıştır. Tip 4 ve tip 6 olarak adlandırılan hava boşluklu ve katmanlı Al köpüklerin ses yutum performansı cam yünü, selüloz panel ve taş yünü haricindeki geleneksel ve sürdürülebilir yaltım malzemelerinden daha iyidir (Çizelge 4.2).

Yalıtım malzemelerinin ses yalıtım performansı ses iletim kaybı (TL) ve ağırlıklı darbe sesi yalıtımı iyileştirme indeksi (ΔL_w) üzerinden değerlendirilmiştir. Tip 1, tip 4 ve tip 6 Al köpüklerin 500 Hz'de ki TL değerler sırasıyla 11,94, 11,57 ve 8,56 olarak belirlenmiştir. Aynı Al köpüklerin maksimum TL değerleri 6300 Hz'de, sırasıyla 19,03 dB, 39,74 dB ve 25,95 dB olarak belirlenmiştir. Diğer yalıtım malzemelerinde ise ΔL_w ses yaltım

performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. ΔL_w verisi olan yalıtım malzemeleri arasında genleştirilmiş polistiren 30 dB ile en iyi darbe sesi yalıtım performansına sahiptir. Bu verilere göre tip 4 Al köpüğün hava kaynaklı ses yalıtım performansı diğer yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında özellikle yüksek frekanslarda daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısı, ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısına ilişkin veriler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Geleneksel ve sürdürülebilir yalıtım malzemelerinin akustik ve ısıl özellikleri [129,130,131]

Malzeme	Kalınlık (cm)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Ses yutum katsayısı 500 Hz, α (-)	Maksimum ses yutum katsayısı, α (-)	Ses iletim kaybı 500 Hz, TL (dB)	Maksimum ses iletim kaybı 6300 Hz, TL (dB)	Darbe sesi yalıtımı indeksi, ΔL_w (dB)
Cam yünü	5	0,050	1	-	-	-	-
Selüloz panel	6	0,039	1	-	-	-	22
Taş yünü	5	0,040	0,79	-	-	-	-
Genleştirilmiş poliüretan	5	0,030	0,61	-	-	-	-
Genleştirilmiş polistiren	4	0,040	0,50	-	-	-	30
Kenaf lifleri	5	0,038	0,74	-	-	-	-
Koyun yünü	6	0,044	0,38	-	-	-	18
Ağaç yünü	-	0,065	0,32	-	-	-	21
Mantar panel	4	0,050	0,39	-	-	-	17
Hindistan cevizi lifi	6	0,043	0,42	-	-	-	23
Tip 1 Al köpük (Bu çalışma)	1,4	1,22	0,27	0,76 (1600 Hz)	11,94	19,03	-
Tip 4 Al köpük (Bu çalışma)	2	-	0,65	0,77 (400 Hz)	11,57	39,74	-
Tip 6 Al köpük (Bu çalışma)	2	-	0,83	0,98 (630 Hz)	8,56	25,95	

Çizelge 4.2'de verilen TL değerleri hava kaynaklı ve ΔL_w ise darbe kaynaklı olduğu için bu veriler kabaca karşılaştırma yapılmasına imkân vermiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, ısı iletim katsayısı ölçümleri için farklı gözeneklilik ve yoğunluk değerlerine sahip Al köpükler kullanılmıştır. Ayrıca delik delme ve hava boşluğu bırakılarak hazırlanan farklı yapılara sahip kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin akustik performans testleri empedans tüpü yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Makro yapılar ile köpüklerin akustik özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada farklı alanlarda gün geçtikçe kullanımı artan kapalı gözenekli Al köpüğün ısı-ses yalıtımı ve gürültü kontrolü sağlamak için kullanımına yönelik; gözenekliliğin, ikincil işlemlerin ve katmanlı yapısının etkileri araştırılmıştır.

Alüminyum köpüklerin ölçülen ısı iletim katsayısının (k_{et}) gözeneklilik oranı ve yoğunluğun azalması ile birlikte azaldığı belirlenmiştir. Gözenek çapının test edilen tüm numuneler için benzer olduğunu göz önüne alarak, gözeneklilik ve yoğunluk değerinin alüminyum köpüklerin ısı iletim katsayısını belirleyen ana parametreler olduğunu belirlenmiştir. Özellikle % 77'lik gözenek oranındaki alüminyum köpüğün ısı iletim katsayısı 1,2 W/mK olarak elde edilmiş ve muadil malzemelere göre iyi olduğu, ısı iletim katsayısı değerlerinin geliştirilme potansiyeli ile farklı sektörlerde fonksiyonel uygulamalar için ısı yalıtımı ve ısı bariyeri olarak iyi bir aday olabileceği belirlenmiştir.

Al köpüklerin ölçülen EIK'ları, gözeneklilik oranı yükseldikçe azalan, gözenekliliğe karşı oldukça hassas olduğu belirlenmiştir. Gözenek büyüklüğünün EIK üzerindeki etkisi daha az önemlidir. Gözeneklerdeki hava ve alüminyumun iskeletin ısı iletim katsayısı sıcaklıkla birlikte arttığından, köpüğün etkin ısı iletim katsayısı sıcaklık ile artmıştır. Isı iletim katsayısında gözlenen farklılıklar, Al matris malzemenin kalınlığına ve gözenek yapısındaki düzensizliklere atfedilmiştir.

Delik delme işlemine tabi tutulmayan kapalı gözenekli alüminyum köpük, daha düşük ses yutum ve çok iyi ses yalıtım özellikleri göstermiştir. Bununla birlikte, tam delik delinmiş kapalı gözenekli alüminyum köpük çok iyi ses yutum davranışı ve zayıf ses yalıtım peformansı sergilemiştir. Buna ek olarak, yarım boy delik delinmiş kapalı gözenekli alüminyum köpük, yüksek frekansta ses yutum ve ses yalıtım özelliklerinin iyi bir kombinasyonunu göstermiştir. Ayrıca, hava boşluğu ile desteklenmiş kapalı gözenekli alüminyum köpükler, orta ve yüksek frekanslarda iyi ses yutum davranışı sergilemiştir.

Frekans, gözeneklilik ve yoğunluğu ne olursa olsun, Al köpüğün ses yalıtım ve yutum performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Farklı frekans aralıklarındaki Al köpüğün TL değerleri farklı mekanizmalar tarafından kontrol edilmekte ve yüksek frekanslardaki ses yalıtım performansı, düşük frekanslardaki ses yalıtım performansından daha iyidir.

Çalışma, gözenekli Al köpüğün, üretildiği metale göre daha iyi bir ısıl ve akustik performans kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca delik delme ve hava boşluğu bırakma gibi ikincil işlemlerin akustik performansı arttırdığı ve çalışılmak istenen veya sönümlenmesi istenen gürültü frekans bandına uygun malzeme üretilmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Alüminyum köpük %100 geri dönüştürülebilir, çevre dostu zararsızlık bir malzeme olarak nakliye, montaj ve çalışma kolaylığı, su geçirmezlik, ortalama 640 °C'ye kadar ergimeme, 780 °C'ye kadar alev almama gibi özellikleri ısı ve ses yalıtımı için kullanılan muadil malzemelerle karşılaştırıldığında daha stabil bir ısıl ve akustik performans sunmasını sağlamıştır.

20 mm kalınlığında üretilen Tip 6 Al köpük 500 Hz ve üzeri frekans bandında çok iyi ses yutum peformansı gösterirken, Tip 4 özellikle 800 Hz ile 6300 Hz frekans aralığındaki ses dalgası için 20 dB ve 40 dB arasında gürültüyü azaltarak ses yalıtımı ve gürültü kontrolü için çok iyi bir performans göstermiştir. Ayrıca doğru optimizasyon yöntemleri uygulanarak mikro, makro yapısal özellikleri ayarlanabilen farklı malzeme veya alaşımlar kullanılarak hafif ve düşük maliyetli olarak üretilen çevreye duyarlı ve yüksek korozyon direncine sahip Al köpükler hem ısıl hem de akustik performansın istendiği sektörlerde, zorlu çalışma şartlarında ısı-ses yalıtımı ve gürültü kontrolü uygulamaları için rekabetçi bir aday olabilecek önemli potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir.

Standart ses yalıtım malzemeleri genellikle Al köpükten çok daha ucuzdur. Bu nedenle Al köpükler, maliyet etkin olarak üretildiklerinde ve fonksiyonel kullanım özelliklerinin kombinasyonu sağladığında uygulama alanları ve kullanımı artacaktır.

Bununla birlikte Al köpükler aynı üretim koşulları kullanıldığında bile gözenek morfolojinin tekrarlanabilirliğinin sabit olmaması ve kapalı gözenekli Al köpüklerin

karmaşık mikroskobik gözenek morfolojisi ısıl ve akustik özellikleri üzerinde araştırma yapmayı zorlaştırmıştır.

Endüstriyel uygulamalar ve üretim sanayisinde kullanımı hızla artan Al köpüklerin ısıl ve akustik performansının belirlenmesi için istenilen test boyutlarında üretilip test edilmesi bu alandaki literatüre ve gelecekte yapılacak çalışmalara önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Öneriler

Açık gözenekli köpük numunelerinin aksine, delikli kapalı gözenekli Al köpük numuneler seçici ses yutum spektrumları sunmaktadır (geniş frekans bantları aksine). Bu, ele alınacak gürültü spektrumu biliniyorsa, Al köpük imalatı işlemi sırasında avantajlı olabilir. Maksimum yutumun meydana geldiği frekans, bir gürültü kaynağı spektrumunun bilgisine göre avantajlı bir şekilde değiştirilebilir. Farklı frekans ve gürültü seviyelerinde kapalı gözenekli Al köpükler uygun işlemler yapılarak ses yalıtımı ve gürültü azaltımı için kullanılabilir. Özellikle yüksek frekanslarda ses yutumu ve yalıtımı için tip 3 Al köpük kullanılabilir. Düşük frekansta ses yutumu için hava boşluğuna sahip tip 4 veya tip 6 alüminyum köpük kullanılabilir.

Delik delme, yüzey cildinin kaldırma, hava boşluğu bırakma gibi ikincil işlemler yapılmış, ağırlık ve kalınlığına göre optimize edilmiş çok katmanlı Al esaslı metalik köpük malzemler çok iyi bir akustik performans sağlayabilir ve farklı alanlarda istenen veya çalışılan frekans bandında ses yalıtımı ve gürültü kontrolü için geniş kullanım alanı bulabilir.

Gözenek boyutunun ısı-ses yalıtımı, ses yutumunun seçiciliği ve maksimum ses yutumunun gerçekleştiği frekansın üzerindeki etkisi araştırılmalıdır.

Al köpük arkasında hava boşluğu bırakılarak kullanılabilir. Ayrıca boşluklu yapısı mineral yün, koyun yünü gibi ısıl ve akustik özellikleri iyi olan malzemelerle doldurulabilir.

Al köpüklerin akustik özellikleri, metalik köpüklerin diğer özellikleriyle (hafiflik, ısıl ve kimyasal kararlılık, çarpışma anında enerji emme, mekanik özellikler), mineral yün veya

polimer köpükleri gibi yaygın ses emicilerinden daha çekici hale getirmek ve rekabet gücünü arttırmak için birleştirilebilir.

Farklı sektörlerde kullanım alanı hızla artan Al vb. metalik köpükler üzerine yapılan bilimsel araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin artması, karmaşık yapılı bu malzemeler hakkında bilgi edinilmesini, yeni alaşımlar ve üretim yöntemleri geliştirilerek, köpük homojenliğini ve istenilen özelliklerin tekrarlanabilir olarak üretilmesine katkı sağlanmalıdır. Maliyet etkin üretim süreçleri, kalite ve tekrarlanabilir üretimin sağlanması fonksiyonel kullanımı arttırabilir.

Alüminyum köpük, yol ve bina yapımı için, yanıcı olmayan inşaat malzemeleri olarak kendinden destekli hafif paneller şeklinde otellerde, alışveriş merkezlerinde ve diğer halka açık alanlarda çeşitli ısı ve ses yalıtımı uygulamaları için düşük yoğunluk, büyük yüzey alanı ve montaj kolaylığı nedeniyle diğer muadil malzemelere göre avantaj sağlayabilir.

Al köpüklerin ısıl ve akustik malzeme performansının artırılmasına yönelik yapılacak çalışmalar malzemenin gözeneklilik, kalınlık, yoğunluk değerlerinin ve köpük yapısının ses geçirgen hale getirilmesi için yapılan çeşitli işlemlerin ısı-ses yalıtımı ve gürültü kontrolü üzerindeki etkisini içerebilir. Ayrıca ısıl ve akustik performansın arttırılması üzerinde hangi faktörlerin önemli bir etkiye sahip olabileceğini belirlemek için farklı hammadde alaşımları, üretim yöntem ve parametreleri kullanılabilir.

Rezonans çukuru, malzemenin ses geçiş kaybını (TL) dolayısı ile ses yalıtım performansını olumsuz etkilediğinden, etkisini azaltmak için rezonans frekansını bulunmasını istemediğimiz bölgeden kaydırılmalıdır. Al köpükler katmanlı malzemeler kullanılarak ve hava boşluğu ile desteklenerek rezonansın oluştuğu frkans kaydırılabilir. Örneğin hava boşluğu genişliği azaldıkça sertliği artar ve rezonans daha yüksek bir frekansta oluşur. Boşluğun arttırılması, rezonansın daha düşük frekanslarda oluşmasını sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Sözer N. (2005). *Türkiye'de İlgili Yönetmeliklere Uygun Isı, Su, Ses ve Yangın Yalıtımı Çözümleri, Yalıtım Malzemeleri ve Bir Bina Projesi Üzerinde Uygulama Örneği.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 20-21.

2. Aksoylu C. (2014). *Yapılardaki Ses Izalasyonunun Bilgisayar Ortamında Simülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-5.

3. Chauhan, A. (2008). Study of noise pollution level in different places of Haridwar and Dehradun city. *Environment Conservation Journal*, 9(3), 21-25.

4. Demirkale S.Y. ve Aşcıgil M.(2007, 25-28 Ekim). *Sağlıklı kentlerle ve yapılarla ilgili Türkiye'nin gürültü politikası*, VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresinde sunuldu, İzmir.

5. Güner Ç. (2000). Gürültünün sağlık üzerine etkileri. *Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 9(7), 251-253.

6. Yılmaz H. K. (2009). *Binalarda Dış Duvarlarda Kullanılan Isı Yalıtım Kaplamalarının Enerji Korunum Performansları Açısından Incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 3-5.

7. Altınışık, K. (2006). *Isı yalıtımı*(1. Basım). Ankara: Nobel Basımevi, 56.

8. Ülker S. (2009). *Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 22-24.

9. Türker, A. (2003, 8-11 Ekim.). *Soğuk hat yalıtımında elastomerik kauçuk köpüğü*. VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisinde sunuldu, İzmir.

10. Arslan, M.A. ve Aktaş, M. (2018). İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 299-320.

11. EN 12664.(2001). Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – dry and moist products of medium and low thermal resistance, European Committee for Standardization.

12. EN 12667.(2001). Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – products of high and medium thermal resistance, European Committee for Standardization.

13. EN 12939.(2000). Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – thick products of high and medium thermal resistance, European Committee for Standardization.

14. ASTM C518-10. (2010).Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus, American Society for Testing and Materials.

15. ASTM C177-13.(2013). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus, American Society for Testing and Materials.

16. ISO 8990.(2013). Thermal insulation – determination of steady-state thermal transmission properties – calibrated and guarded hot box, International Organization for Standardization.

17. EN 1602.(2013). Thermal insulating products for building applications. Determination of the apparent density, European Committee for Standardization.

18. ASTM C303-10.(2016). Standard test method for dimensions and density of preformed block and board-type thermal insulation, American Society for Testing and Materials.

19. ISO 11357-4. (2014).Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Determination of specific heat capacity, International Organization for Standardization.

20. ASTM 1269-11.(2011). Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry, American Society for Testing and Materials.

21. ISO 22007-1.(2009). Plastics –determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 1: General principles, International Organization for Standardization.

22. ISO 22007-2. (2008).Plastics –determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method, International Organization for Standardization.

23. ISO 22007-3. (2008).Plastics – determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 3: Temperature wave analysis method, International Organization for Standardization.

24. ISO 22007-4.(2008). Plastics – determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 4: Laser flash method, International Organization for Standardization.

25. ISO 6946.(2007). Building components and building elements – thermal resistance and thermal transmittance – calculation method, International Organization for Standardization.

26. İnternet: Ses Yalıtım Kılavuzu. (2017, Nisan). Yalıtım dergisi, 21 (157). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.yalitim.net%2Federgi%2F18%2F157%2Findex.html+&date=2018-05-28, Son Erişim Tarihi: 05.04.2018.

27. Demirkale S.Y. (2007). *Çevre ve yapı akustiği* (Birinci baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi, 390-392.

28. Huang, Y., Zhou, D., Xie, Y., Yang, J. and Kong, J. (2014). Tunable sound absorption of silicone rubber materials via mesoporous silica. *Royal Society of Chemistry Advances*,4(29), 15176-15177.

29. Demirkale, S.Y., (2008). Yapı elemanlarında sesin yayılması, çeşitli duvarların ses geçiş kaybı değerlerinin karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Raporu, *İstanbul*, 5-7.

30. Kaya, A. İ. ve Dalgar, T. (2017). Ses yalıtımı açısından doğal liflerin akustik özellikleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 1, 25-37.

31. Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29(5), 38-45.

32. Vidinlimen G.T., (2010). *Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Gözenekli Malzemelerin Akustik Özellikleri ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23.

33. Kurra, S.(2009). *Çevre Gürültüsü ve Yönetimi*. İstanbul:Bahçeşehir Üniversitesi Yayınları, 37.

34. Kayıkçı, M.E. ve Genç, A., (2004). *Gürültünün insan sağlığı üzerine etkileri çalışma yaşamında gürültü ve işitmenin korunması*.(Birinci Baskı). Ankara: *Türk Tabipler Birliği Yayınları*, 75-82.

35. Meriç, I., Tavukçuoğlu, A. ve Çalışkan, M. (2014, Mart). *Malzemelerin mikro yapı özelliklerinin akustik performansa etkisi, gözeneklilik yapısı ile ses yutma özellikleri arasındaki ilişki*. 1. Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresinde sunuldu, İstanbul.

36. Karaağaçlıoğlu, İ.E., (2012). *Bor ve Mineral Katkılı Selülozik Yalıtım Malzemesi Üretimi ve Karakterizasyonu.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 70-71.

37. Ravindran, A. (2007). *Investigation of inverse acoustical characterization of porous materials used in aircraft noise control application*, Master Dissertation, Wichita State University, Kansas, 16-18.

38. ISO 717-1. (2013). Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization,

39. ISO 10140. (2010). Acoustics – laboratory measurement of sound insulation of building elements, International Organization for Standardization.

40. EN 12354-1. (2000). Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms, European Committee for Standardization.

41. ISO 16283-1. (2014). Acoustics – field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, International Organization for Standardization.

42. ISO 717-2. (2013). Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation, International Organization for Standardization.

43. EN 12354-2. (2000). Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms, European Committee for Standardization.

44. ISO 16283-2. (2015). Acoustics – field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation, International Organization for Standardization.

45. ISO 9052-1. (1989). Acoustics – determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings, International Organization for Standardization,

46. ISO 354. (2003). Acoustics-measurement of sound absorption in a reverberation room, International Organization for Standardization.

47. ASTM C423-09a. (2009). Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method, American Society for Testing and Materials.

48. ISO 10534-2. (1998). Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method, International Organization for Standardization.

49. Chen, S. (2015). *A Study on Properties of Novel Metallic Foam for Nuclear Applications.* Doctoral Dissertation, North Carolina State University, Carolina, 232.

50. Sidebotham, G. (2015). Heat transfer modes: Conduction, convection, and radiation, in: heat transfer modeling. *Springer International Publishing*, 37(7), 61–93.

51. Akseli, I. (2005). *The Applıcatıon of Aluminum Foam for the Heat and Noıse Reductıon in Automobıles.* Master Dissertation, İzmir Institute of Technology, İzmir, 4-6.

52. Zhu, X., Ai, S., Lu, X., Ling, X., Zhu, L. and Liu, B. (2014). Thermal conductivity of closed-cell aluminum foam based on the 3D geometrical reconstruction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,72(8), 242–249.

53. Hong, Y., Qing, N. and Mingyang, M. (2015). A lattice monte carlo analysis of the effective thermal conductivity of closed-cell aluminum foams and an experimental verification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 853–860.

54. Öchsner, A. and Grácio, J. (2005). On the macroscopic thermal properties of syntactic metal foams. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 1(2), 171–181.

55. Demirkale, S.Y., Dincer, M.A., Manioğlu, G. and Tanacan, L. (2012, August). *Sound trensmission through facede walls designed for sound, heat and moisture control using brick with attached gypsum board*. 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, New York, USA.

56. Özer, M., (1979). *Yapı akustiği ve ses yalıtımı.* İstanbul: Arpaz Matbaacılık, 45.

57. Cox, T. J. and D'Antonio, P. (2005). *Acoustic absorbers and diffusers.* London and New York: Spon Press, 16-18.

58. Yıldırım, K.B. (2015). *Acoustıc Propertıes of Polyurethane Composıtıon Reınforced Wıth Carbon Nanotubes and Sılıcon Oxıde Nano-Powder*. Master Dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

59. Moretti, E.,Belloni, E. and Agosti, F. (2016). Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization. *Applied Energy*, 169, 421–432.

60. Fahy, F. (2001). *Foundations of engineering acoustics*.(1st Edition). London: Academic Press, 56-112.

61. Umberto, B.U. and Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment,* 94, 840-852.

62. Panneton, R. (2007). Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(19), 217-222.

63. Yosun, M. ve Gökdağ, H. (2017, 14-15-Eylül). *Sonlu eleman tabanlı empedans tüpü ölçümü ile gözenekli malzemelerin akustik özelliklerinin tahmini için yöntem belirleme ve doğrulama.* 12. Ulusal Akustik Kongresinde sunuldu, İzmir.

64. Delaney, M. E., and Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(56),105-116.

65. Allard, J. F. and Atalla, N. (2009). *Propagation of sound in porous media; modeling sound absorbing materials* (Second edition). Chichester: Wiley and Sons, 22,23.

66. Biot, M.A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of Acoustical Society of America*, 28(35), 168-178.

67. Biot, M.A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *Journal of Acoustical Society of America*, 28(35), 179-191.

68. Biľová, M. and Lumnitzer, E. (2011). Acoustical parameters of porous materials and their measurement. *Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 4(9),39-42.

69. Pilon, D. Sgard, F. and Panneton, R. (2003, May). *Frame acoustical excitability: A decoupling criterion for poroelastic materials.* 5th European Conference on Noise Control, Naples, Italy.

70. Johnson, D.L., Koplik, J. and Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 379-402.

71. Champoux, Y. and Allard, J.F. (1991). Dynamic tortuosity and bulk modulus in air saturated porous media. *Journal of Applied Physics*, 70(89), 1975-1979.

72. Wolkesson, M. (2013). *Evaluation of impedance tube methods - A two microphone in-situ method for road surfaces and the three microphone transfer function method for porous materials*. Masters Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2-6.

73. Olivieri, O., Bolton, J.S., and Taewook, Y. (2006, 3-6 December). *Measurement of transmission loss of materials using a standing wave tube*. Inter-Noise, Honolulu, Hawaii.

74. Kimura, M., Kunio, J., Schuhmacher, A. and Ryu, Y. (2014, November). A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss. 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Melbourne.

75. Erdal B. (2012). Ses İletim Kaybi Ölçüm Düzeneği Tasarımı ve Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 20-22.

76. Çinici, H. (2012). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Al Esaslı Parçacık Takviyeli Sandviç Metalik Köpük Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-3.

77. Gökmen, U. (2009). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Al Esaslı Parçacık Takviyeli Metalik Köpük Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-25.

78. Sezer, Ş.D. (2009). Kompakt Toz Ergitme Tekniği İle Alüminyum Köpük Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-25.

79. Azzi, W.E. (2004). A Systematıc Study on the Mechanıcal And Thermal Propertıes of Open Cell Metal Foams For Aerospace Applıcatıons. Master Dissertation, North Carolina State University, Raleigh North Carolina, 2-109.

80. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 46, 559-632.

81. Uzun, A. (2009). TM Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Küresel Şekilli Metalik Köpük Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-20.

82. García-Moreno, F. (2016), Commercial applications of metal foams: Their properties and production. Materials, 9(2), 85.

83. Ceylanoğlu, Ö. (2014). Toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum esaslı çinko takviyeli metalik köpük üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-15.

84. Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams. Journals of Materials,55(12), 22-27.

85. Shashikant, V.R., Kanthale, V.S. and Kothavale, B.S. (2016). Review on application of aluminum foam in sound absorption technology. International Journal of Current Engineering and Technology Special, 3, 178-180.

86. Karakoç, H. (2012). Sıcak Presleme Yöntemi Ile Alüminyum Esaslı Köpük Malzeme Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-22.

87. Degıscher, H.P. and Krıszt, B., (2002). Handbook of cellular metals: Production, processing and applications. Weinheim: Wiley-VCH, 33-63.

88. Stöbener, K., Baumeister, J., Lehmhus, D., Stanzick, H. and Zöllmer, V. (2003). Composites based on metallic foams: phenomenology, production, properties and principles. International Conference Advanced Metallic Materials, Smolenice, Slovakia, 281-286.

89. Sarıtaş, S., Türker, M. and Durlu, N. (2007). Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri. Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları,299-324.

90. Markandan, K., Chin, J.K. and Tan, M.T. (2017). Recent progress in graphene based ceramic composites: a review, Journal of Materials Research, 32(1), 84-106.

91. Kondoh, K. (2012). Powder metallurgy(3. Edition). Rijeka: In Tech, 47-72.

92. Lefebvre, L. P., Banhart J. and Dunand D. C. (2008). Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments. Advanced Engineering Materials, 10(9), 775-787.

93. Repossı, E. (2015). On the mathematical modeling of a metal foam expansion process. Doctoral Thesis, Polıtecnıco Dı Mılano, Mılano, 45.

94. Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson,L. J., Hutchinson, J. W. and Wadley, H. N. G. (2000). Metal foams: A design guide. Boston: Butterworth-Heinemann, 121-133.

95. Hahn, M. and Otto, A. (2000). Herstellungvon 3D-Kernverbunden mit zellularen Kernstrukturenaus aluminium. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 6(31), 538-540.

96. Ersoy, E. (2014). Kapalı Hücreli Metalik Köpüklerin Yüksek Sıcaklıkta Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 59-60.

97. Sığırtmaç, T., Çakır, M.C. ve Uğuz, A. (2012, Kasım). Alüminyum Metal Köpük Malzemelerin İkincil İşlemlemlerinin İncelenmesi. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresinde sunuldu, Balıkesir.

98. Çağlar, S.İ. (2009). Alüminyum Esaslı Kompozit Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 4.

99. Yavuz, İ. (2010). Metalik köpük malzemeler ve uygulama alanları. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi,2(1), 49-58.

100. Banhart, J. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. International Journal of Vehicle Design, Hahn-Meitner-Institut Berlin, 37(2-3) 114-125.

101. Srivastava, V.C. and Sahoo, K.L. (2007). Processing, stabilization and applications of metallic foam. Art of Science Materials Science-Poland, 25(3), 733-753.

102. Başer, T. A. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.

103. Yao, G.C., Luo, H.J. and CAO, Z.K. (2015, June). *The manufacturing technology of aluminum foam material and some special equipments*. International Conference on Material Science and Application, China.

104. Nosko, M., Simančík, F., Florek, R., Tobolka, P., Jerz, J., Mínárıková, N. and Kováčık, J. (2017). Sound absorption ability of aluminium foams. *Metallic Foams*, 1(1), 15-41.

105. Banhart, J. and Seeliger, H.W. (2012). Recent trends in aluminum foam sandwich technology. *Advanced Engineering Materials*, 14(12), 1082–1087.

106. Allen, T., Busby, J., Meyer, M. and Petti, D. (2010). Materials challenges for nuclear systems. *Materials Today*, 13(12), 14–23.

107. Amjad, S. (2001). *Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminum Foams*. Master Dissertation, University of Cambridge, Cambridge, 23.

108. Perrot C., Chevillotte F., Jaouen L. and Hoang M. T. (2013, April). Acoustics properties and applications, in metallic foams fundamentals and applications. *DesTech Publications*, 285-316.

109. Pilon, D., Panneton, R., Sgard, F. and Lefebvre, L.P. (2004). Influence of mıcro-structural propertıes on the acoustıc performances of novel metallıc foams. *Canadian Acoustics*, 32(3), 24-25.

110. Yang, X., Lu, T. and Kim, T. (2013). Effective thermal conductivity modelling for closed-cell porous media with analytical shape factors. *Transport in Porous Media*,100(2), 211-224.

111. Solórzano, E., Reglero, J.A., Rodríguez-Pérez., M.A., Lehmhus, D., Wichmann, M. and de Saja, J.A., (2008). An experimental study on the thermal conductivity of aluminium foams by using the transient plane source method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(9), 6259–6267.

112. Badida, M., Sobotová, L., Liptai, P. and Moravec, M. (2015). Aluminium foam and its acoustic properties. *European Journal of Environmental and Safety Sciences*, 3(1), 5-10.

113. Byakova, A., Gnyloskurenko, S., Bezimyanniy, Y. and Nakamura, T. (2014). Closed-cell aluminum foam of improved sound absorption ability: Manufacture and properties.*Metals*, 4(3), 445-454.

114. Paek, J.W., Kang, B.H.., Kim, S.Y. and Hyun, J.M. (2000). Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials. *International Journal of Thermophysics*, 21(2), 453-464.

115. Lu, T.J., Hess, A. and Ashby., M.F. (1999). Sound absorption in metallic foams. *Journal of Applıed Physıcs*, 85(11), 7528-7539.

116. Yu, H., Yao, G., Wang, X., Lı, B., Yın, Y. and Lıu, K. (2007). Sound insulation property of A1-Si closed-cell aluminum foam bare board material. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(2007), 93-98.

117. Fan, X.., Chen, X. and Lı, Y. (2011). The structure and acoustic properties of aluminum foams by gas injection method. *Advanced Materials Research*, 146, 1049-1055.

118. Babcsa´n, N., Me´sza´ros, I. and Hegman, N., (2003). Thermal and electrical conductivity measurements on aluminum foams. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*,34(4), 391-394.

119. Lu, G., Su, B.Y., Lı, Z.Q., Wang, Z.H., Song, W.D.and Tang, H.P. (2014). Thermal Properties of Closed-Cell Alumınum wıth cırcular pores. *Thermal Scıence,* 18(5), 1619-1624.

120. Wang, H., Zhou, X.Y., Long, B., Yang, J. and Lıu, H.Z. (2016). Thermal properties of closed-cell aluminum foams prepared by melt foaming technology. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(2016), 3147−3153.

121. Xiaa, X., Zhang, Z., Zhao, W., Li, C., Ding, J., Liu, C. and Liu, Y. (2017). Acoustic properties of closed-cell aluminum foams with different macrostructures. *Journal of Materials Science & Technology*, 33(11),1227–1234.

122. Chevillotte, F., Perrot, C. and Panneton, R. (2010). Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell metallic foams. *The Journal of the Acoustical Society of America*,128(4), 1766-1776.

123. Duan Cuiyun, D., Guang, C., Xinbang, X. and Peisheng, L. (2012). Sound absorption characteristics of a high-temperature sintering porous ceramic material. *Applied Acoustics*, 73, 865–871.

124. ASTM E1530-11.(2016). Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA.

125. Laghi, L., Pennecchi, F. and Raiteri, G. (2011). Uncertainty analysis of thermal conductivity measurements in materials for energy-efficient buildings. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*,2, 141–151.

126. TS EN ISO 10534-1.(2004). Akustik- Empedans borularında ses absorplama katsayısı ve empedansın tayini - Bölüm 1: Duran dalga oranını kullanma metodu. TSE, Ankara.

127. TS EN ISO 10534-2.(2003). Akustik-Empedans borularındaki ses absorpsiyon katsayısının ve empedansın tayini-Bölüm 2: Aktarım fonksiyonu metodu. TSE, Ankara.

128. Dyga, R. and Witczak, S. (2012, August). *Investigation of effective thermal conductivity aluminum foams*. 20th International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague.

129. Ricciardi, P., Belloni, E. and Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled materials: thermal and acoustic performance and life cycle assessment. *Applied Energy*, 134, 150-162.

130. Asdrubali, F., Schiavoni, S. and Horoshenkov, K. V. (2012). A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*, 19(4), 283-311.

131. Asdrubali, F. (2006, May). Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. In Proceedings of Euronoise (Vol. 30). Euronoise 2006, Tampere, Finland.

EKLER

EK-1. Al köpüğün ısı iletim katsayısı ölçüm raporları

T.C.
ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI
MADEN TETKİK VE ARAMA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı

Üniversiteler Mahallesi Dumlupınar Bulvarı No: 139 06800 Çankaya/ANKARA
Tel: 0312 201 10 00 pbx Faks: 0312 287 54 09
http://www.mta.gov.tr numune@mta.gov.tr

MTA
MAT-18003329
02/05/2018

Sayı : 91817988.302.03/
Number

ANALİZ/TEST RAPORU
ANALYSIS/TEST REPORT

MÜŞTERİ BİLGİLERİ / *CUSTOMER INFORMATION*

Müşteri Adı / *Customer Name*	:	**T. C. Gazi Üni. Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Müh. Böl.**
Müşteri Adresi / *Customer Address*	:	06500 Teknik Okullar ANKARA
Başvuru Yapan Kişi / *Submitted by*	:	
Başvuru Tarihi / *Date of Application*	:	25/04/2018
Numune Alma Tarihi / *Date of Sampling*	:	-
Proje Kodu / *Project Code*	:	-

NUMUNE KABUL BİLGİLERİ / *SAMPLE ACCEPTANCE INFORMATION*

Numune Kayıt No / *Receipt Number of Sample*	:	18-H-002631 - 18-H-002636
Numune Kayıt Tarihi / *Receipt Date of Sample*	:	25/04/2018
Numunenin Tanımı / *Sample Type*	:	Diğer
Numune Sayısı / *Number of Samples*	:	6
Numunenin Mühür Durumu / *Status of Seal*	:	□ Mühürlü / *Sealed* ■ Mühürsüz / *Unsealed*
Mühür Tarihi / *Date of Seal*	:	-
İstenen Analiz/Test Kodları / *Requested Analysis/Test Codes*	:	35-30-TS-100

LABORATUVAR BİLGİLERİ / *LABORATORY INFORMATION*

Analiz/Test Tarihi / *Date of Analysis/Test*	:	26/04/2018-02/05/2018
Şahit Numune / *Witness Sample*	:	□ Alındı / *Could be taken* ■ Alınamadı / *Could not be taken*
Şahit Numune Saklama Süresi / *Storage Period of Witness Sample*	:	
Rapor Sayfa Sayısı / *Number of Pages of Report*	:	2

AÇIKLAMALAR / *REMARKS*

explanation

Onaylayan
Approved by

Mehmet ULUSOY
Teknoloji Koordinatörü

12 Mart 2018
Mühür / Tarih
Seal / Date

- Analiz/test sonuçları ve metotları takip eden sayfalarda verilmiştir. *The analysis/test results and methods are given on the following pages.*
- Sonuçlar sadece analizi/testi yapılan numuneye aittir. *The results are valid for only the analysed/tested sample.*
- Rapor tamamen veya kısmen çoğaltılamaz/yayınlanamaz. *This report shall not be reproduced/published even partially.*
- İmzasız ve mühürsüz rapor geçersizdir. *Report without signature and seal is not valid.*

KY.FR.5.10.2/1 Rev.No/Tarih: 08/24.10.2017

EK-1. (devam) Al köpüğün ısı iletim katsayısı ölçüm raporları

T.C.
ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI
MADEN TETKİK VE ARAMA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı
Üniversiteler Mahallesi Dumlupınar Bulvarı No: 139 06800 Çankaya/ANKARA
Tel: 0312 201 10 00 pbx Faks: 0312 287 54 09
http://www.mta.gov.tr numune@mta.gov.tr

MTA
MAT-18003329
02/05/2018

ANALİZ/TEST RAPORU
ANALYSIS/TEST REPORT

ANALİZ/TEST SONUÇLARI
ANALYSIS/TEST RESULTS

6 adet numunenin ısı iletim katsayısı ölçümleri 20 ^{0}C ile 100 ^{0}C sıcaklık aralığında ölçülmüş olup, sonuç ekte (6 sayfa) verilmiştir.

Ozan BAYRAM
Maden Yüksek Müh.
(Analiz/Test Sorumlusu)
Person In Charge of Analysis/Test

Gökhan EROL
(Birim Yöneticisi)
Supervisor of Laboratory

Mühür / Tarih
Seal / Date
T.C. 02 Mart 2018

- Analiz/test sonuçları ve metotları takip eden sayfalarda verilmitir.
The analysis/test results and methods are given on the following pages.
- Sonuçlar sadece analizi/testi yapılan numuneye aittir.
The results are valid for only the analysed/tested sample.
- Rapor tamamen veya kısmen çoğaltılamaz/yayınlanamaz.
This report shall not be reproduced/published even partially.
- İmzasız ve mühürsüz rapor geçersizdir.
Report without signature and seal is not valid.

EK-2. Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TÜRKAK - TÜRK AKREDİTASYON KURUMU tarafından akredite
Accredited by TÜRKAK

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI

Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü

Adres:Aydınlı Mah. Gülennur Sok. No: 7/1 Tuzla/ İSTANBUL
Tel:+90 (216) 560 05 27 Fax: +90 (216) 560 05 65 E-posta:yalitim@tse.org.tr Web:www.tse.org.tr

HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER
CONSTRUCTION MATERIALS FIRE AND ACOUSTICS LABORATORY DIRECTORATE
Address:Aydınlı Mah. Gülennur Sok. No: 7/1 Tuzla/ İSTANBUL
Tel:+90 (216) 560 05 27 Fax: +90 (216) 560 05 65 E-mail:yalitim@tse.org.tr Web:www.tse.org.tr

Test
TS EN ISO/IEC 17025
AB-0001-T

AB-0001-T
400755
04-18

MUAYENE VE DENEY RAPORU
TEST REPORT

Deneyi Talep Eden (Adı,Adresi,Şehir vb.) *Customer (Name,Adress,City etc.)*	:	GAZİ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ BİRİMİ (GAZİ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ BİRİMİ: REKTÖRLÜK BİNASI 06500 TEKNİKOKULLAR --ANKARA)
Deney Talep Tarihi/No *Order Date / No*	:	06.03.2018 / 206947
Numunenin Tanımı (No,Cins, Marka, Tip, Tür, Model vb.) *Sample Description(No,Type,Mark,Model etc.)*	:	392826.BOŞLUKSUZ METALİK KÖPÜK, , TİP 1 ,- ,- , 3.00 adet
Numune Kabul Tarihi *Test Item Receipt Date*	:	02.03.2018
Deneylerin Yapıldığı Tarih *Date of Test*	:	28.03.2018 - 10.04.2018
Uygulanan Standard / Metod *Applied Standard/Method*	:	TS EN ISO 10534-2:2003-04 Akustik-Empedans borularındaki ses absorpsiyon katsayısının ve empedansın tayini-Bölüm 2:Aktarım fonksiyonu metodu (ISO 10534-2:1998)
Raporun Sayfa Sayısı *Number of pages of the report*	:	5
Açıklamalar *Remarks*	:	

Türk Akreditasyon Kurumu(TÜRKAK) deney raporlarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği(EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği(ILAC) ile karşılıklı tanınma antlaşmasını imzalamıştır.
The Turkish Accreditation Acency(TURKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation(EA) and of the International Laboratory Accreditation(ILAC) for the Mutual recognition of test reports.
Deney ve/veya ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri (olması halinde) ve deney metodları bu raporun tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.
The test and/or measurement results, the uncertainties (if applicable) with confidence probability and test methods are given on the following pages which are part of this report.
Bu rapor özel deney talebine istinaden düzenlenmiş olup, Standartlara Uygunluk Belgesi niteliğinde değildir. Partiyi temsil etmez, ayrıca ilan, reklam ve ihalelerde uygunluk belgesi niteliğinde kullanılamaz.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Deney Sorumlusu** *Person in charge of tests*	**Kontrol Eden** *Reviewer*	**Onaylayan** *Approved by*
	10.04.2018	Fatih ÖZTÜRK Uzman Yardımcısı	Sencer GÜVEN Teknik Şef	Sencer GÜVEN Laboratuvar Müdürü V.

Bu rapor, hazırlayan laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mührsüz raporlar geçersizdir.
Bu rapor, sadece deneyi yapılan numune için geçerlidir ve "Ürün Belgesi" yerine geçmez.
This test report shall not be reproduced other than in full except with the written permission of the laboratory. Test reports without signature and seal are not valid.
This test report represents only tested sample(s), and shall not be used as Product Certificate

EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI TUZLA YAPI MALZ. YANGIN VE AKUSTİK LAB.
HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER TUZLA CONST. MAT. FİRE AND ACOUSTİCS LABORATORY

AB-0001-T
400755
04 / 18

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*
TS EN ISO 10534-2:2003

Deney Laboratuvarının Adı ve Adresi	TSE Yapı Malz. Yangın ve Akustik Laboratuvarı Akustik Bölümü Aydınlı Mah. Gülennur Sokak No:7/1 Tuzla/İSTANBUL Tel: 0 (216) 560 0 500
Deneyi Talep Edenin Adı ve Adresi	Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Rektörlük Binası 06500 Teknikokullar/ANKARA
Numune Tipi	Boşluksuz Metalik Köpük (Tip 1) (≈100/28mm çaplarında)

1. Giriş

Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin talebi üzerine Boşluksuz Metalik Köpük (Tip 1) kodlu ürününün absorpsiyon katsayısının ölçülmesi amacıyla **"TS EN ISO 10534-2:2003 Akustik – Empedans borularındaki ses absorpsiyon katsayısının ve empedansın tayini –Bölüm 2: Aktarım fonksiyonu metodu"** standardına göre **28.03.2018** tarihinde TSE Tuzla Yapı Malz. Yangın ve Akustik Laboratuvarı Akustik Bölümünde deney yapılmıştır.

2. Deney numunesi

Deney numunesi deneyi talep eden kişi tarafından seçilmiş ve laboratuvarımıza ulaştırılmıştır.
Numunenin üretim tarihi: 02/2018
Numunenin laboratuvara ulaşma tarihi: 03/2018

Deney numunesinin tanımlanması

Ürün tanımı: Tip 1 kodlu, deliği bulunmayan 20 mm kalınlığında alüminyum esaslı boşluksuz metalik köpük

Deney numunelerinin sayısı: ≈100 mm ve ≈28 mm çaplarında 3'er adet deney numunesi

Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kütle (g) ((100/28) mm çaplı numune için)		Yoğunluk (kg/m³)
100 mm	≈20	≈44,10	≈ 3,64	≈ 280,87
28 mm				

*Ürün tanımlamalarında deneyi talep eden kişinin beyanı esas alınmıştır.

TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI 1954

EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*
TS EN ISO 10534-2:2003

2.1 Deney numunesinin montajı

Ses yutum katsayısının belirlenmesine yönelik deneyde numune, numune tutucunun ön yüzü ile çıkıntı yapmayacak ve etrafından hava sızdırmayacak şekilde tüpün içerisine monte edilmiştir.

3. Ortam şartları

Sıcaklık [°C]	Bağıl nem [%]	Basınç [kPa]
24 °C	43.3	100,9

4. Yöntem

Deneyde kullanılacak tertibat kullanımdan önce bir seri deney yapılarak kontrol edilmiştir. Ölçmelerden önce hoparlör sıcaklığın kararlı hale gelmesi amacıyla 10 dakika süresince çalıştırılmıştır. Ön deney ve ölçmeler yapıldıktan sonra deney numunesi yukarıda belirtilen montaj koşullarına riayet edilerek tüp içerisine yerleştirilmiştir. Sinyal üreteci ile empedans tüpü arasındaki bağlantı sağlandıktan sonra talep edilen frekans aralığında (100Hz-6,3kHz) her bir 1/3 oktav bant merkez frekansında sinyal oluşturulmuş ve uygun yazılım aracılığıyla sonuçlar elde edilmiştir.

5. Sonuçlar

Üçer numune üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak sonuç elde edilmiştir.1/3 frekans bantlarında ses yutum katsayısı (**α**) değeri müteakip sayfalarda verilmiştir.

TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI 1954

EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI TUZLA YAPI MALZ. YANGIN VE AKUSTİK LAB.
HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER TUZLA CONST. MAT. FİRE AND ACOUSTİCS LABORATORY

AB-0001-T
400755
04 / 18

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*

TS EN ISO 10534-2:2003

Ses absorpsiyon katsayısı (α) ,

Frekans Hz	ALPHA			ALPHA ort
100	0,03	0,02	0,03	**0,02**
125	0,03	0,03	0,03	**0,03**
160	0,04	0,04	0,04	**0,04**
200	0,06	0,06	0,05	**0,06**
250	0,08	0,10	0,07	**0,08**
315	0,11	0,13	0,09	**0,11**
400	0,30	0,32	0,29	**0,30**
500	0,28	0,29	0,24	**0,27**
630	0,38	0,39	0,39	**0,39**
800	0,48	0,48	0,58	**0,51**
1000	0,62	0,60	0,59	**0,60**
1250	0,75	0,74	0,73	**0,74**
1600	0,67	0,66	0,94	**0,76**
2000	0,55	0,54	0,66	**0,58**
2500	0,61	0,52	0,48	**0,54**
3150	0,65	0,47	0,50	**0,54**
4000	0,53	0,57	0,49	**0,53**
5000	0,45	0,69	0,49	**0,54**
6300	0,67	0,63	0,66	**0,65**



TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI 1954

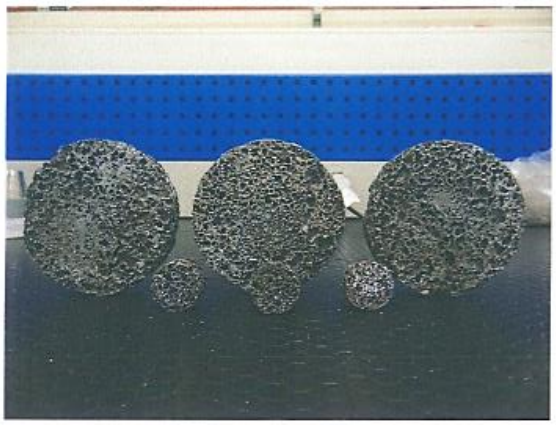
EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI TUZLA YAPI MALZ. YANGIN VE AKUSTİK LAB.
HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER TUZLA CONST. MAT. FİRE AND ACOUSTİCS LABORATORY

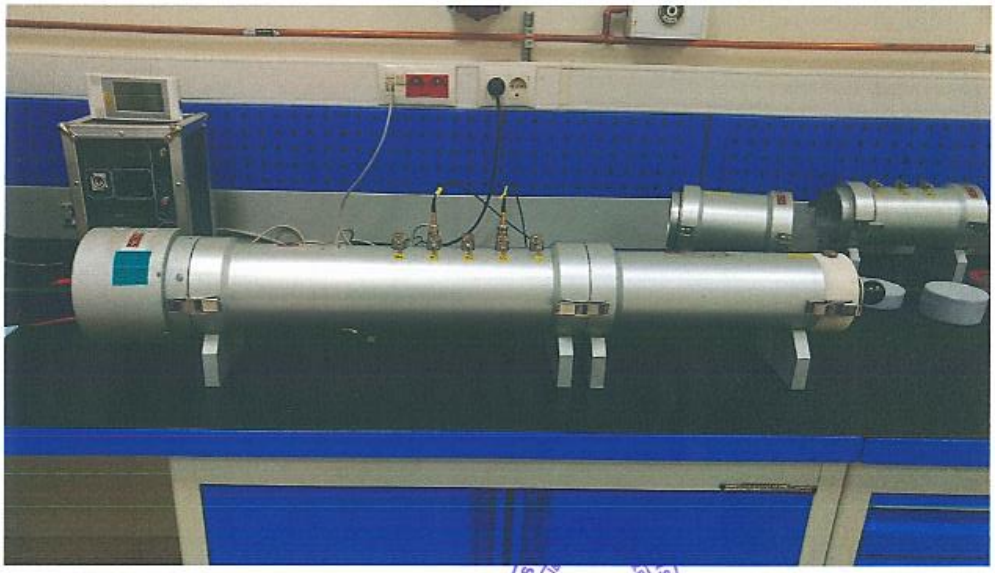
AB-0001-T
400755
04 / 18

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*
TS EN ISO 10534-2:2003

Numuneye ait görsel







EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TÜRKAK - TÜRK AKREDİTASYON KURUMU tarafından akredite
Accredited by TÜRKAK

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI

Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü

Adres:Aydınlı Mah. Gülennur Sok. No: 7/1 Tuzla/ İSTANBUL
Tel:+90 (216) 560 05 27 Fax: +90 (216) 560 05 65 E-posta:yalitim@tse.org.tr Web:www.tse.org.tr

HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER
CONSTRUCTION MATERIALS FIRE AND ACOUSTICS LABORATORY DIRECTORATE
Address:Aydınlı Mah. Gülennur Sok. No: 7/1 Tuzla/ İSTANBUL
Tel:+90 (216) 560 05 27 Fax: +90 (216) 560 05 65 E-mail:yalitim@tse.org.tr Web:www.tse.org.tr

Test
TS EN ISO/IEC 17025
AB-0001-T

AB-0001-T
400799
04-18

MUAYENE VE DENEY RAPORU
TEST REPORT

Deneyi Talep Eden (Adı,Adresi,Şehir vb.) *Customer (Name,Adress,City etc.)*	:	GAZİ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ BİRİMİ (GAZİ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ BİRİMİ: REKTÖRLÜK BİNASI 06500 TEKNİKOKULLAR --ANKARA)
Deney Talep Tarihi/No *Order Date / No*	:	06.03.2018 / 206947
Numunenin Tanımı (No,Cins, Marka, Tip, Tür, Model vb.) *Sample Description(No,Type,Mark,Model etc.)*	:	392827,BOŞLUKSUZ METALİK KÖPÜK, , TİP 1 , - , - , 3.00 adet
Numune Kabul Tarihi *Test Item Receipt Date*	:	02.03.2018
Deneylerin Yapıldığı Tarih *Date of Test*	:	27.03.2018 - 10.04.2018
Uygulanan Standard / Metod *Applied Standard/Method*	:	TS EN ISO 10534-2:2003-04 Akustik-Empedans borularındaki ses absorpsiyon katsayısının ve empedansın tayini-Bölüm 2:Aktarım fonksiyonu metodu (ISO 10534-2:1998)
Raporun Sayfa Sayısı *Number of pages of the report*	:	4
Açıklamalar *Remarks*	:	

Türk Akreditasyon Kurumu(TÜRKAK) deney raporlarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği(EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği(ILAC) ile karşılıklı tanınma antlaşmasını imzalamıştır.
The Turkish Accreditation Acency(TURKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation(EA) and of the International Laboratory Accreditation(ILAC) for the Mutual recognation of test reports.
Deney ve/veya ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri (olması halinde) ve deney metodları bu raporun tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.
The test and/or measurement results, the uncertainties (if applicable) with confidence probability and test methods are given on the following pages which are part of this report.
Bu rapor özel deney talebine istinaden düzenlenmiş olup, Standartlara Uygunluk Belgesi niteliğinde değildir. Partiyi temsil etmez, ayrıca ilan, reklam ve ihalelerde uygunluk belgesi niteliğinde kullanılamaz.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Deney Sorumlusu** *Person in charge of tests*	**Kontrol Eden** *Reviewer*	**Onaylayan** *Approved by*
	10.04.2018	Fatih ÖZTÜRK Uzman Yardımcısı	Sencer GÜVEN Teknik Şef	Sencer GÜVEN Laboratuvar Müdürü V.

Bu rapor, hazırlayan laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz raporlar geçersizdir.
Bu rapor, sadece deneyi yapılan numune için geçerlidir ve "Ürün Belgesi" yerine geçmez.
This test report shall not be reproduced other than in full except with the written permission of the laboratory. Test reports without signature and seal are not valid.
This test report represents only tested sample(s), and shall not be used as Product Certificate

EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI YAPI MALZ. YANGIN VE AKUSTİK LAB.
HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER CONST. MAT. FIRE AND ACOUSTICS LABORATORY

AB-0001-T
400799
04 / 18

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*

TS EN ISO 10534-2:2003

Deney Laboratuvarının Adı ve Adresi	TSE Yapı Malz. Yangın ve Akustik Laboratuvarı Akustik Bölümü Aydınlı Mah. Gülennur Sokak No:7/1 Tuzla/İSTANBUL Tel: 0(216) 560 0 500
Deneyi Talep Edenin Adı ve Adresi	Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Rektörlük Binası 06500 Teknikokullar/ANKARA
Numune Tipi	Boşluksuz Metalik Köpük (Tip 1) (≈100/28mm çaplarında)

1. Giriş

Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin talebi üzerine Boşluksuz Metalik Köpük (Tip 1) ürününün ses geçiş kaybı (R) değerinin belirlenmesi amacıyla **"TS EN ISO 10534-2:2003 Akustik – Empedans borularındaki ses absorpsiyon katsayısının ve empedansın tayini –Bölüm 2: Aktarım fonksiyonu metodu"** standardına göre **27.03.2018** tarihinde TSE Yapı Malz. Yangın ve Akustik Laboratuvarı Akustik Bölümünde deney yapılmıştır.

2. Deney numunesi

Deney numunesi firma tarafından seçilmiş ve laboratuvarımıza ulaştırılmıştır.
Numunenin üretim tarihi: 02/2018
Numunenin laboratuvara ulaşma tarihi: 03/2018

Deney numunesinin tanımlanması

Ürün tanımı: Tip 1 kodlu, deliği bulunmayan 20 mm kalınlığında alüminyum esaslı boşluksuz metalik köpük

Deney numunelerinin sayısı: ≈100 mm ve ≈28 mm çaplarında 3'er adet deney numunesi

Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kütle (g) ((100/28) mm çaplı numune için)		Yoğunluk (kg/m³)
100 mm	≈20	≈44,10	≈ 3,64	≈ 280,87
28 mm				

*Ürün tanımlamalarında deneyi talep eden kişinin beyanı esas alınmıştır.

TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI 1954

EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*

TS EN ISO 10534-2:2003

2.1 Deney numunesinin montajı

Ses geçiş kaybı ölçümünde numune, numune tutucunun ön yüzü ile çıkıntı yapmayacak ve etrafından hava sızdırmayacak şekilde conta ile tüpün içerisine monte edilmiştir.

3. Ortam şartları

Sıcaklık [°C]	Bağıl nem [%]	Basınç [kPa]
23,0	43,5	100,7

4. Yöntem

Deneyde kullanılacak tertibat kullanımdan önce bir seri deney yapılarak kontrol edilmiştir. Ölçmelerden önce hoparlör, sıcaklığın kararlı hale gelmesi amacıyla 10 dakika süresince çalıştırılmıştır. Ön deney ve ölçmeler yapıldıktan sonra deney numunesi yukarıda belirtilen montaj koşullarına riayet edilerek tüp içerisine yerleştirilmiştir. Her bir çap için 3'er adet numune üzerinde ölçüm yapılmıştır. Sinyal üreteci ile empedans tüpü arasındaki bağlantı sağlandıktan sonra talep edilen frekans aralığında (100Hz-6,3kHz) her bir 1/3 oktav bant merkez frekansında sinyal oluşturulmuş ve uygun yazılım aracılığıyla sonuçlar elde edilmiştir.

5. Sonuçlar

Üçer numune üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak sonuç elde edilmiştir. 1/3 frekans bantlarında ses geçiş kaybı değeri (R) müteakip sayfalarda verilmiştir.

Ses geçiş kaybı (R),

Freans Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
R_{ort}(dB)	8,85	8,92	9,32	9,35	9,06	9,92	9,48	11,94	11,89	13,04	11,91	10,71	8,25	8,92	9,35	10,94	14,46	17,55	19,03

TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI 1954

EK-2. (devam) Al köpüğün α ve TL ölçüm raporları

TSE DENEY ve KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI YAPI MALZ. YANGIN VE AKUSTİK LAB.
HEADSHIP OF TSE TEST and CALIBRATION CENTER CONST. MAT. FIRE AND ACOUSTICS LABORATORY

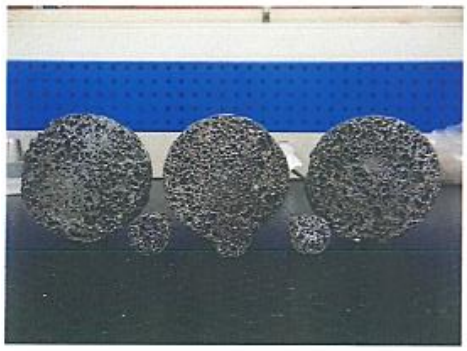
AB-0001-T
400799
04 / 18

MUAYENE - DENEY SONUÇLARI *TEST RESULTS*

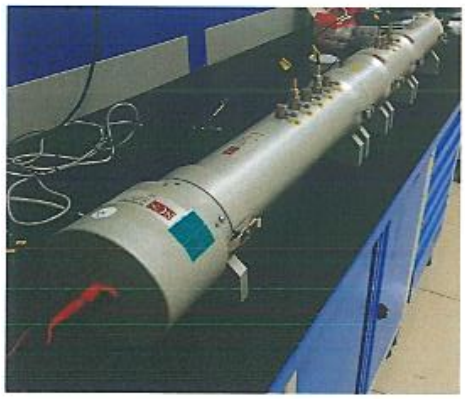
TS EN ISO 10534-2:2003

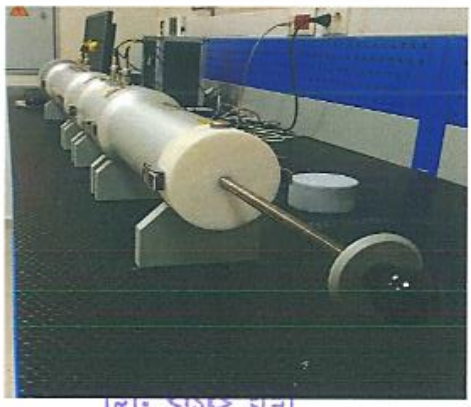


Numuneye ait görsel









ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ARSLAN, Mehmet Ali

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 23.03.1983, Trabzon

Medeni hali : Evli

e-mail : mehmetali.arslan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/ Enerji Sistemleri Mühendisliği	2018
Yükseklisans	Gazi Üniversitesi/ Otomotiv Öğretmenliği	2007
Lisans	Gazi Üniversitesi / Otomotiv Öğretmenliği	2004
Lise	Bursa Tophane Teknik Lisesi	2000

İşDeneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Gazi Üniversitesi	Proje Asist.
2013-2017	APC Proje ve Danışmanlık Hizmetleri Ltd. Ştd	Proje Uzmanı
2010-2013	Şef Otomotiv	Servis Yönetim

YabancıDil

İngilizce

Yayınlar

Arslan, M.A. (2017, 14-15-Eylül). *Malzemelerin akustik performansına etki eden makro yapı özellikleri.* 12. Ulusal Akustik Kongresinde sunuldu, İzmir.

Arslan, M.A. and Çelikten, İ. (2010, June). *Investigation of Performance and Emissions of Diesel and Biodiesel Fuels at Different Injection Pressures.* 11th International Combustion Symposium, Sarajevo.

Arslan, M.A. ve Aktaş, M. (2018). İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi,* 21(2), 299-320.

Celikten, I., Koca, A. and Arslan, M. A. (2010). Comparison of performance and emissions of diesel fuel, rapeseed and soybean oil methyl esters injected at different pressures. *Renewable Energy,* 35(4), 814-820.

Çelikten, İ. ve Arslan, M. A. (2008). Dizel yakıtı, kanola yağı ve soya yağı metil esterlerinin direkt püskürtmeli bir dizel motorunda performans ve emisyonlarına etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4), 829-836.

Hobiler

Klasik müzik



GAZİ GELECEKTİR..