

# **SES YUTUCU ve YANSITICI YÜZEY TASARIMI**

## **SOUND ABSORBING and REFLECTING SURFACE DESIGN**

**ÖZDEN DOĞRUEK**

**PROF. DR. ÇİĞDEM SEÇKİN GÜREL**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2021



# ÖZET

## SES YUTUCU ve YANSITICI YÜZEY TASARIMI

**Özden DOĞRUEK**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL**

**Haziran 2021, 81 sayfa**

Bu tez çalışması, sesi yansıtma ve yutma özelliği sağlayabilen çeşitli yüzeylerin, farklı malzeme tiplerini içerecek şekilde çok katmanlı olarak tasarımına yöneliktir. Tasarımlarda katı, sıvı ve gözenekli malzeme tipleri kullanılmış olup, bu malzemelerin katmanlı yapı içindeki sıralamasının, yüzey davranışına etkileri incelenmiştir. Tasarlanan yüzeylerin ince olmasına özen gösterilmiştir. Yöntem olarak çok katmanlı yapıların analizi için elverişli bulunan Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılmış, her bir katman ve katmanların arayüzleri birer matris ile modellenmiştir. Tasarımlarda gözenekli malzemelerin kullanılması durumunda ayrıca Biot Teorisinden faydalanılmıştır. Tasarlanan yüzeylerin yutucu özelliğine yönelik olarak sönümlenme katsayısı, yansıtıcı özelliğine yönelik olarak yansıma katsayısı incelenmiştir. Çok katmanlı yapıda kullanılan malzemelerin sıralamalarının belirlenmesinde literatürde bu konuda henüz yer almamış olan Thue-Morse, Baum-Sweet ve Dragon dizilerinden yararlanılmış, ayrıca periyodik malzeme dizilimine yer verilmiştir. İncelemelerde MATLAB programı kullanılmıştır. Elde edilen farklı katman dizilimli yapıların ses sönümlenme ve yansıtma davranışları tartışılmış, içlerinden en iyi performansı sağlayan yapılar literatüre güncel uygulamalar için önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Transfer Matris Metodu, Çok katmanlı yapı, gözenekli-katı-sıvı malzeme, sönümlenme katsayısı, yansıma katsayısı, Thue-Morse dizisi, Baum-Sweet dizisi, Dragon dizisi.

# **ABSTRACT**

## **SOUND ABSORBING and REFLECTING SURFACE DESIGN**

**Özden DOĞRUER**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor : Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL**

**June 2021, 81 pages**

This thesis study focuses on the multi-layered design of various surfaces that can reflect and absorb sound, including different material types. Solid, liquid and porous material types are used in the designs, and the effects of the order of these materials in the layered structure on the surface behavior are investigated. Taken consideration that created surfaces are thin. The Transfer Matrix Method (TMM), which is suitable for the analysis of multilayer structures, is used as a method, and each layer and the interfaces of the layers are modeled with a matrix. In the case of using porous materials in the designs, the Biot Theory has also been used. The absorption coefficient for the absorbent properties and the reflection coefficient for the reflective properties of the designed surfaces are examined. Thue-Morse, Baum-Sweet and Dragon sequences, which have not been included in the literature on this subject yet, are used to determine the order of materials used in multi-layered structures, and also periodic material sequences are included. MATLAB program is used in the analysis. The sound absorption and reflection properties of the different layered structures obtained are discussed, and the structures that provided the best performance are suggested for current applications in the literature.

**Keywords :** Transfer Matrix Method, multi-layered structure, porous-solid-fluid material, absorption coefficient, reflection coefficient, Thue-Morse sequence, Baum-Sweet sequence, Dragon sequence.

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince bana destek olan, bilgi ve deneyimlerinden yararlandıđım deđerli tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. ıđdem Sekin GÜREL'e teőekkűr ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen, her zaman yanımda olan, bugűnlere gelmemde en bűyűk katkıyı sađlayan Kıymetli Anneme, Babama ve Kardeőlerime sonsuz teőekkűr ediyorum.

# İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER TABLOSU .....	iv
ŞEKİLLER.....	vii
ÇİZELGELER.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Tezin Kapsamı.....	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ .....	3
3. SES TEORİSİ.....	6
3.1 Ses ile İlgili Temel Bilgiler .....	6
3.1.1 Ses Basıncı.....	6
3.1.2 Ses Şiddeti.....	7
3.1.3 Ses gücü .....	8
3.1.4 Ses Hızı.....	8
3.1.5 Dalga Boyu .....	8
3.1.6 Ses İletim Kaybı.....	9
3.1.7 Akustik Empedans .....	9
3.1.8 Ses Sönümlenme Katsayısı .....	9
3.2 Akustik Tasarımlarda Kullanılan Malzemeler .....	10
4. TRANSFER MATRİS METODU ve ORTAMLARIN MATRİS ile GÖSTERİMİ ....	12
4.1 Transfer Matris Metodu (TMM).....	13
4.2 Katı Malzeme Ortam Özellikleri ve Matris Gösterimi .....	15
4.3 Sıvı Malzeme Ortam Özellikleri ve Matris Gösterimi .....	19

4.4	Gözenekli Malzeme Ortam Özellikleri ve Matris Gösterimi.....	21
4.5	Birbirine Bağlantılı, Çok Katmanlı Yapıların Transfer Matris Hesabı .....	30
4.6	Genel Transfer Matris Hesabı.....	34
4.7	Akustik Değişkenlerin Hesaplanması .....	36
5.	LİTERATÜRDE YER ALAN AKUSTİK YÜZEY TASARIMLARI .....	39
5.1	Katı Malzemeden Oluşan Tek Katmanlı Yüzey .....	39
5.2	Katı ve Sıvı Malzemelerden Oluşan Üç Katmanlı Yüzey .....	42
5.3	Gözenekli Malzemeden Oluşan Tek Katmanlı Yüzey.....	47
5.4	Gözenekli Malzemelerden Oluşan İki Katmanlı Yüzey .....	50
6.	ÇOK KATMANLI AKUSTİK YÜZEY TASARIMI .....	53
6.1	Gözenekli Malzemelerden Oluşan Üç Katmanlı Yüzey.....	53
6.2	Baum-Sweet Dizisi Kullanılarak Oluşturulan Yüzey Tasarımları.....	55
6.2.1	Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	56
6.2.2	Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	58
6.2.3	Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey .....	60
6.3	Thue-Morse Dizisi Kullanılarak Oluşturulan Yüzey Tasarımları .....	61
6.3.1	Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	62
6.3.2	Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	64
6.3.3	Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey .....	65
6.4	Periyodik Dizilen Malzemelerin Kullanıldığı Çok Katmanlı Yüzey Tasarımı ....	65
6.4.1	Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	65
6.4.2	Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	67
6.4.3	Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey .....	68
6.5	Dragon Eğri Dizisi Kullanılarak Oluşturulan Yüzey Tasarımları .....	69
6.5.1	Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	70
6.5.2	Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey.....	72
6.5.3	Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey .....	73

7. DEĞERLENDİRME VE GENEL SONUÇLAR .....	76
8. KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	81



## ŞEKİLLER

Şekil 3.1. Sırasıyla hücresele, lifli ve tanecikli malzeme tipleri [13].....	10
Şekil 4.1. TMM için gerekli olan girdiler ve elde edilen çıktılar. ....	14
Şekil 4.2. Çok katmanlı yapı gösterimi [9].....	14
Şekil 4.3. Boyuna ilerleyen ses partiküllerinin hareketi. ....	15
Şekil 4.4. Enine ilerleyen ses partiküllerinin hareketi. ....	16
Şekil 4.5. Tek katmanlı malzeme ortamı [3]. ....	18
Şekil 4.6. Kayma modülü gösterimi [14]. ....	22
Şekil 4.7. Açık ve kapalı hücreli köpük [15].....	23
Şekil 4.8. Akış direncinin gösterimi [3]. ....	23
Şekil 4.9. Gözenekli malzemedeki kıvrımlılık durumu [16].....	25
Şekil 4.10. Termal ve viskozite karakteristik uzunluğu [17].....	26
Şekil 4.11. Malzemeye uygulanan basınç gösterimi [14].....	27
Şekil 4.12. Tek katmanlı gözenekli malzeme ortamı [3].....	30
Şekil 4.13. Birbirine bağlantılı, çok katmanlı malzeme yapısı [9].....	31
Şekil 4.14. İki katmanlı yüzey gösterimi. ....	34
Şekil 5.1. Literatürde yer alan çelik ortamın iletim kaybı [6]. ....	40
Şekil 5.2. 3 mm kalınlığındaki çelik malzemenin iletim kaybı. ....	40
Şekil 5.3. Literatürde belirtilen farklı kalınlıktaki katı malzemenin iletim kaybı [6]. ....	41
Şekil 5.4. Farklı katman kalınlığındaki katı malzemenin iletim kaybı.....	41
Şekil 5.5. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-reel kısım [4]. ....	43
Şekil 5.6. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-reel kısım. ....	43
Şekil 5.7. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-sanal kısım [4]. ....	43
Şekil 5.8. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-sanal kısım. ....	43
Şekil 5.9. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-reel kısım [4]. ....	44
Şekil 5.10. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-reel kısım. ....	44
Şekil 5.11. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-sanal kısım [4]. ...	44
Şekil 5.12. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-sanal kısım. ....	44
Şekil 5.13. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-reel kısım [4]. ....	45
Şekil 5.14. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-reel kısım. ....	45
Şekil 5.15. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-sanal kısım [4]. ...	45

Şekil 5.16. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-sanal kısım.....	45
Şekil 5.17. Literatürde yer alan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-reel kısım [4]. ....	46
Şekil 5.18. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-reel kısım.....	46
Şekil 5.19. Literatürde yer alan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-sanal kısım [4]. ...	46
Şekil 5.20. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-sanal kısım. ....	46
Şekil 5.21. Duvar ile sonlandırılmış ortam gösterimi [8].....	47
Şekil 5.22. Literatürde yer alan akusticell malzemesinin yüzey empedansı [8]. ....	48
Şekil 5.23. Tablo 5.4'te yer alan gözenekli malzemenin kullanılması ile elde edilen yüzey empedansı.....	48
Şekil 5.24. Literatürde yer alan akusticell malzemesinin sönümleme katsayısı [8]. ....	49
Şekil 5.25. Tablo 5.4'te yer alan malzemenin kullanılması ile elde edilen yüzeyin sönümleme katsayısı.....	49
Şekil 5.26. İki katmanlı yapının gösterimi [8]. ....	50
Şekil 5.27. Literatürde yer alan, plastik köpük ve akusticell malzemesinden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı [8].....	51
Şekil 5.28. Akusticell, plastik köpük malzemeleri ve her ikisinin kullanıldığı yapının sönümleme katsayısı. ....	51
Şekil 6.1. Gözenekli malzemelerin dizilimi [7]. ....	54
Şekil 6.2. Tablo 6.1'de belirtilen malzemelerin, farklı sıralanmasıyla elde edilen yüzeylerin sönümleme katsayısı. ....	54
Şekil 6.3. Yapı 1-2-3 için yansıma katsayısı-reel ve sanal kısım.....	55
Şekil 6.4. Yapı 3-2-1 için yansıma katsayısı-reel ve sanal kısım.....	55
Şekil 6.5. Baum-Sweet dizisinden faydalanılarak oluşturulan malzeme dizilimi.....	56
Şekil 6.6. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-cam yünü. ....	57
Şekil 6.7. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.....	57
Şekil 6.8. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-plastik köpük.....	58
Şekil 6.9. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.....	58
Şekil 6.10. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	59
Şekil 6.11. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.....	59
Şekil 6.12. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	61
Şekil 6.13. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	61
Şekil 6.14. Sayıların ifade edilirken sahip oldukları 1 sayısına göre Thue-Morse dizisi....	61

Şekil 6.15. Thue-Morse dizisinden faydalanılarak oluşturulan malzeme dizilimi. ....	62
Şekil 6.16. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-cam yünü. ....	62
Şekil 6.17. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	63
Şekil 6.18. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-plastik köpük. ....	63
Şekil 6.19. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	63
Şekil 6.20. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	64
Şekil 6.21. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	64
Şekil 6.22. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	65
Şekil 6.23. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	65
Şekil 6.24. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-cam yünü. ....	66
Şekil 6.25. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	66
Şekil 6.26. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-plastik köpük. ....	67
Şekil 6.27. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	67
Şekil 6.28. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	68
Şekil 6.29. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	68
Şekil 6.30. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	69
Şekil 6.31. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	69
Şekil 6.32. Dragon eğri dizisinden faydalanılarak oluşturulan malzeme dizilimi. ....	70
Şekil 6.33. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-cam yünü. ....	70
Şekil 6.34. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	70
Şekil 6.35. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-plastik köpük. ....	71
Şekil 6.36. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	71
Şekil 6.37. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	72
Şekil 6.38. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	72
Şekil 6.39. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı. ....	73
Şekil 6.40. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı. ....	73
Şekil 6.41. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-28 mm. .	74
Şekil 6.42. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümleme katsayısı-56 mm. .	74

Şekil 6.43. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı-28 mm. .... 75

Şekil 6.44. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı-56 mm. .... 75

## ÇİZELGELER

Tablo 5.1. Çelik malzemesinin özellikleri.....	39
Tablo 5.2. Katı malzemenin kalınlığına bağlı, iletim kaybının minimum olduğu frekans değerleri.....	42
Tablo 5.3. Katı ve sıvı malzemelerin özellikleri .....	42
Tablo 5.4. Gözenekli malzeme özellikleri.....	48
Tablo 5.5. Gözenekli malzemelerin özellikleri .....	50
Tablo 6.1. Gözenekli malzemelerin özellikleri .....	53
Tablo 6.2. Alçıpan ve cam yünü malzemelerinin özellikleri.....	56
Tablo 6.3. Alçıpan ve plastik köpük malzemelerinin özellikleri.....	59
Tablo 6.4. Hava ve plastik köpük malzemelerinin özellikleri.....	60



# 1. GİRİŞ

Ses, canlılar tarafından duyulabilen periyodik basınç değişimi olarak tanımlanmaktadır. Akustik ise sesi inceleyen bilim dalı olarak ifade edilmektedir. Akustik bilim dalı katı, sıvı, gaz maddelerdeki ses dalga yayılımının fiziksel özelliklerini incelemektedir. Kısaca, sesin hareketine bağlı olarak sesin davranışını tespit etmektedir. Sesin seviyesine bağlı olarak gürültüye sebep olan titreşimlerin ve bu titreşimler sonucunda oluşan gürültünün kontrolünü sağlamakla da ilgilenmektedir. Günlük yaşamda çok sayıda ses kaynağı olduğu için yayılan ses seviyesi gürültü seviyelerine çıkabildiğinden ses yalıtımı önemli bir konu olarak gündeme gelmektedir. Ses yalıtımına çözüm olarak çok sayıda çalışma yapılmaktadır ve amaç zararlı olabilecek yüksek seviyedeki seslerden insanları korumaktır. Sorun kaynağından çözülebiliyorsa gürültü kaynağını daha sessiz hale getirmek çözüm olabilir ancak bu tarzda bir önlem alınamayacak bir durum söz konusu ise kaynağın etkilerinden korunmak amaçlı önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu durum örnek üzerinden açıklanırsa gürültü gelen bir odanın kapısı kapatıldığında, gürültü duvar, odadaki eşyalar ve kapı tarafından soğurulacaktır. Bu da gürültünün bir yerden bir yere taşınmasını engellemekle birlikte sesin rahatsız eden seviyelerden düşmesini sağlayacaktır.

Ses bir dalga olduğu için engelle karşılaştığında yansıma özelliği gösterebilmektedir. Yüze gelen ses dalgasının bir kısmı çarptığı yüzey üzerinde soğurulur, bir kısmı da yankı olarak adlandırılan şekle dönüşmektedir. Yansıyan sese yankı denir.

Ses yalıtımı için farklı malzeme tipleri vardır. Bu malzemeler katı, sıvı ve gözenekli olabilmektedir. Yüzey tasarlanırken malzemelerin sıralamaları, fiziksel özellikleri önem taşımaktadır çünkü oluşturulan yapının sınır koşulları ve buna bağlı olarak sönümleme özelliği değişmektedir. Yansıtıcı ve yutucu yüzey tasarımı yaparken farklı tip malzemeleri içeren yüzeyler oluşturulacak ve simülasyon ortamında Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılacaktır. Yüzey tasarımında kullanılan her bir katman için TMM kullanılması modellemeyi sadeleştirmektedir, böylelikle katmanlı yapının geniş frekans bant aralığında göstereceği davranışı incelemek daha kolay olmaktadır.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında amaç, sesi yansıtan ve soğuran çok katmanlı akustik yüzeylerin tasarlanması ve simülasyonlarının gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmalar gerçekleştirilirken katmanlı yapının ince olmasına özen gösterilecektir.

## **1.2 Tezin Kapsamı**

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle ses teorisine yönelik bilgilendirme yer almaktadır. Benzer konularla ilgili daha önce yapılan çalışmalar üzerine literatür araştırmalarından bahsedilmektedir. Teorik araştırmalar sonrası simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarına tek katmanlı yapılarla başlanıp, sonrasında çok katmanlı yapılarla devam edilmiştir. Yüzeyler için özgün tasarım çalışmalarına geçilmeden önce algoritmanın doğrulanması amacıyla denemeler gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın doğrulanmasına bağlı olarak farklı malzeme sıralamalarını içeren özgün yüzeyler oluşturulmuştur. Tasarlanan yüzeyler MATLAB ortamında oluşturulmuş ve yüzeyde yer alan katmanlar Transfer Matris Metodu (TMM) ile modellenmiştir. Elde edilen çıktılar doğrultusunda, kullanılan malzeme tiplerinin ve sıralamalarının yüzey davranışına etkileri incelenmektedir.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ses sönümlenme ve yansıtma, akustik ortamlar için önemli ifadelerdir. Ses sönümlenme konusunda akustik empedans önemli bir parametredir. Utsuno ve arkadaşları [1] tarafından oluşturulan çalışmada, gözenekli malzemelerin karakteristik empedansının ve iletim katsayısının ölçülebilmesi için transfer fonksiyon metodu kullanılmıştır. Malzeme yüzeyinden elde edilen bir dizi farklı akustik empedans ölçümüne dayanan yöntemdir. Açıklanan yöntem doğrultusunda, gözenekli malzemenin sönümlenme katsayısı ve empedans ölçümlerine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yöntem, deneysel çalışmalara dayanmaktadır.

Lifli olan gözenekli malzemelerde, Delany ve Bazley kuralı ile dalga sayısı ve yüzeyin karakteristik empedansı geniş frekans aralığı için hesaplanabilmektedir. Kuralın uygulandığı ölçümler doğrultusunda elde edilen sonuçlara göre açılma hızı ( $\omega = 2\pi f$ ), kullanılan malzemenin akış direnci ( $\sigma$ ) dalga sayısını ve yüzey empedansını doğrudan etkilemektedir. Delany ve Bazley kuralında  $X$  parametresi yer almakta olup, parametrenin geçerli olduğu sınır değerleri vardır [2, 3].

$$X = \rho_0 f / \sigma \quad (2.1)$$

$$0.01 < X < 1.0 \quad (2.2)$$

$X$  parametresinin belirtilen aralıkta kalması koşulu ile karakteristik empedans ve dalga sayısı hesaplanabilmektedir.  $\rho_0$  ve  $c_0$  sırasıyla havanın yoğunluğunu ve havadaki ses hızını ifade etmektedir.  $Z_c$  karakteristik empedansı,  $k$  ise dalga sayısını göstermektedir [2, 3].

$$Z_c = \rho_0 c_0 [1 + 0.057X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732}] \quad (2.3)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} [1 + 0.0978X^{-0.700} - j0.189X^{-0.595}] \quad (2.4)$$

Gözenekli malzemelerin içinde var olan kıvrımlılık etkisi viskoz geçirgenliği ifade etmek için kullanılan temel katsayıdır. Kıvrımlılık katsayısının frekansa bağıllığı dikkate alındığı durumlarda Johnson modeli kullanılmaktadır. Malzemenin termal değişim ve sıkıştırılmazlık özelliği doğrudan hacimsel modülü ile ilgilidir. Gözenekli malzeme içindeki havanın hacimsel modülü hesaplanırken Lafarge modeli kullanılabilir [3].

Hacimsel modül hesaplamasında termal değişim parametresine yer verilmektedir. Termal değişim katsayısının bulunmasına yönelik Lafarge modelinde yer alan katsayı kullanılacağı gibi Champoux–Allard modeli de kullanılabilir [3].

Tanımlı modeller dışında, Wilson modeli literatürde yer almaktadır. Wilson modelinde, yoğunluk ve hacim modülü için tanımlamalar yapılmıştır ancak düşük ve yüksek frekans bandı için kullanımı uygun olmayan bir modeldir [3].

Lafarge modeli literatürde yer alan bilgiler doğrultusunda hacim modülü hesaplamasında en iyi tahmin sonucunu sağlamıştır. Champoux-Allard modelinin ise, yüzey empedansı ve sönümlenme katsayısı tahmini için güvenle kullanılabilirliği belirtilmiştir [3]. Bu tez çalışmasında, gözenekli malzemelerin ilgili katsayılarının hesabında Lafarge modeli ve Champoux-Allard modeli kullanılmaktadır.

Gözenekli malzemeler, katı ve sıvı malzemelere göre daha karmaşık yapıya sahiptirler. Malzeme içerisinde hava ile çerçevenin aynı anda hareket ettiğini gösteren bir model ile ses iletimi tahmin edilebilmektedir. Bu model, Biot Teorisi tarafından sağlanmaktadır. Hava ile doyurulmuş gözenekli malzemelerde, hava ile çerçeve arasında kuvvetli bir etkileşim söz konusu olduğunda, malzeme içinde ilerleyen boyuna dalgalar, yavaş dalga ve hızlı dalga olarak tanımlanırlar. Hızlı dalgalarda, sıvı ve çerçeve hızlarının oranı 1 değerine yakın çıkar. Yavaş dalgalarda durum tam tersidir. Malzemenin viskozite özelliğinden dolayı sönümlenme özelliği, yavaş dalgalar için daha kuvvetli olmaktadır. Hava ile doyurulmuş sıradan gözenekli malzemelerde, boyuna ilerleyen dalgaları çerçeve kaynaklı ve hava kaynaklı dalgalar olarak adlandırmak daha uygundur. Hava ile çerçeve arasında etkileşim olmama durumu da gözlenebilir. Bu durumda, bir dalga havada, öteki dalga ise çerçevede ilerler. Çerçevenin havadan ağır olması nedeniyle, çerçeve titreşimleri gözenekli malzemedeki havanın titreşimlerine neden olur, ancak çerçeve etrafında hava dolaşırken çerçeve neredeyse hareketsiz kalmaktadır. Hava ile çerçeve arasında zayıf bir etkileşim mevcut ise, iki dalgadan biri olan havadan yayılan dalga, çoğunlukla havada yayılırken çerçeve kaynaklı dalga her iki ortamda da yayılır. Malzeme içinde ilerleyen enine dalga ise çerçeve kaynaklı dalga olarak tanımlanır [3].

Gözenekli malzeme dışında katı ve sıvı malzemeler de akustik yüzey tasarımında kullanılmaktadır. Katı malzeme ortamında boyuna ve enine ilerleyen dalgalar gözlenirken, sıvı malzeme ortamında sadece boyuna dalga ilerlemesi mevcut olup enine dalga ilerlemesi gözlenmemektedir [4].

Katmanlı yapıdaki akustik alanı modellemek amacıyla TMM kullanılmaktadır. Ortamdaki her bir katmanın yanal olarak sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilmektedir. Katmanlı yapıyı oluşturan malzemelerin tipine bağlı olarak TMM ile ortamın akustik performansı hakkında yorum yapılabilir [5].

Abid ve arkadaşları [6] tarafından oluşturulan çalışmada, tek katmanlı ortam tasarımına yer verilmiştir. Belirtilen yüzeyin farklı katman kalınlığında olma durumlarına bağlı olarak yüzeyin, çarpan sese göstereceği davranış doğrultusunda incelemeler yapılmıştır. Yüzeyin farklı katman kalınlığında olmasının sağladığı yalıtım özelliği, katman kalınlığı arttıkça artmıştır.

Luo ve arkadaşları [7-8] tarafından oluşturulan çalışmada, katmanlı yapı oluşturulurken gözenekli malzeme tipi kullanılmıştır. Kullanılan gözenekli malzemelerin her birinin ve bir arada buldukları katmanlı yapının akustik performansı incelenmiştir.

Brouard ve arkadaşları [9] tarafından oluşturulan çalışmada, gözenekli malzemeden oluşan yapının ilk katmanına malzeme ortamını örtecek şekilde ince bir katman eklenmiştir. Ortam içinde ilerleyen dalgalar, transfer matrislerin kullanımıyla modellenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, katı, sıvı ve gözenekli malzemelerin kendi içlerinde farklı dizilimlere göre sıralanmalarının yüzeyin sönümlenme ve yansıma davranışına etkisi incelenmektedir.

### 3. SES TEORİSİ

Ses daha önce bahsedildiği gibi canlılar tarafından duyulan titreşimlerdir. Sesin şiddetine bağlı olarak basınç değişimi oluşmaktadır. Sesin sahip olduğu şiddet fazla olursa sesin çevresine uyguladığı basıncın etkisi de buna bağlı olarak fazla olacaktır [10].

Frekans, bir olayın bir saniye içerisinde tekrarlanma durumu olarak açıklanmaktadır. Sesin frekansı ise bir saniyede oluşan titreşim sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Birimi Hertz'dir. İnsan kulağı, 20 Hz – 20 kHz frekans aralığındaki sesleri duyabilmektedir ancak, 3000 – 6000 Hz frekans aralığında hassas olmakla birlikte 20  $\mu$ Pascal kadar düşük basınca sahip sesleri işitebilmektedir [11]. 20kHz' den fazla olan seslere Ultrasonik Ses denir. Normal ses seviyelerine göre çok daha fazla titreşime sahip olduğundan enerjisi daha yüksektir. Frekansı 20 Hz seviyesinin altında yer alan sesler de İnfrasonik Ses türüne girmektedir. Frekans değerine bağlı olarak, seslerin sahip olduğu enerji düşüktür.

Belli frekans aralıklarına duyarlı canlılara örnek vermek gerekirse;

- 1-20 000 Hz frekans aralığındaki sesleri filler,
- 20-20 000 Hz aralığındaki sesleri insanlar,
- 20 000 Hz değerinin üzerindeki sesleri yarasalar işitebilmektedir.

Ses teorisi başlığı altında, temel ses bilgileri ve akustik alanında kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilecektir.

#### 3.1 Ses ile İlgili Temel Bilgiler

Ses boşlukta yayılmadığından ilk olarak sesin yayılabilmesi için katı, sıvı, gözenekli vb. ortama ihtiyaç vardır. Ses dalgası örneğin, katı bir ortamla karşılaştığında malzemeye çarptığı an malzemenin taneciklerini titreştirecek sonrasında ses dalgası tanecikler üzerinden ilerlemeye başlayacaktır ancak ilerlerken enerji kayıpları yaşanacak ve belirli bir mesafeden sonra ses sönmülenecektir. Sesin hızı ortam koşullarına bağlı olarak değişmektedir (sıcaklık, yoğunluk vb.).

##### 3.1.1 Ses Basıncı

Atmosferik basıncın yukarısı ve aşağısında oluşan basınçtaki değişimler ses basıncına karşılık gelir ve birimi Pascal (Pa)'dır. Daha önce 20  $\mu$ Pascal'a kadar sesin işitileceğinden bahsedilmişti, bu basınç değeri atmosferik hava basıncı ile karşılaştırıldığında değişim

yaklaşık olarak  $2 \times 10^{-10}$  olmuştur. Atmosferik hava basıncı  $101.3 \times 10^3$  Pa'dır. Saf ton'daki ses dalgası Eşitlik 3.1'de ifade edilmektedir. Dalganın tek frekanslı olduğu duruma karşılık gelmektedir [11].

$$P(t) = P_0 \sin(2\pi f)t \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de  $P(t)$  ifadesi, atmosferik basınca göre maksimum ve minimum olarak ani değişen basınç değeridir.  $P_0$  ifadesi ise ses basıncının anlık maksimum büyüklüğüdür.  $f$  frekansa,  $t$  ise zamana karşılık gelmektedir. Ses dalgası saf tonda olmadığı durumda, farklı frekans bantlarında yer alan seslerden de meydana gelebilir bu durumda spektrumları incelenir. Ses basınç seviyesi, ölçülen ses basınç değerinin eşik değer olarak kabul edilen  $20 \mu\text{Pa}$  değerine oranlanmasından elde edilecektir. Ancak  $20 \mu\text{Pa}$  değeri sadece havada yayılan ses için geçerlidir, hava dışında bir ortamda sesin yayılması gerektiğinde referans ses basınç değeri  $1 \mu\text{Pa}$  olarak kullanılmalıdır [11].

$$\text{Ses basınç seviyesi} = L_P = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \text{ dB} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 Ses Şiddeti

Ses dalgalarının birim alana dik doğrultuda taşıdığı güç olarak tanımlanmaktadır. Birimi  $\text{Watt/m}^2$  'dir. Ses şiddetinin maksimum değeri, ses dalgası yüzeye dik olarak ilerlediğinde elde edilir. Eğer ses dalgası yüzeye paralel doğrultuda yönelmişse elde edilecek ses şiddeti sıfır olacaktır. Bu iki seçenek dışında sesin yüzeye açılı geldiği durum vardır, bu noktada da maksimum ses şiddeti bahsi geçen yüzeye çarpacak sesin dik bileşene göre değişmektedir. Yansıtıcı yüzey olmayan bir ortamda serbestçe dolaşan bir dalganın ses basıncı, ortamdaki ses şiddeti ile doğru orantılıdır yani ses şiddeti arttığında ses basıncı da artmaktadır [11].

$$I = P/A (\text{Watt/m}^2) \quad (3.3)$$

$$\text{Ses şiddeti seviyesi} = L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te belirtilen  $I$  değeri sesin ölçülen şiddetini,  $I_0$  ise referans değeri belirtmektedir.  $I_0$ ' in değeri  $10^{-12} \text{ Watt/m}^2$  olarak kullanılmaktadır.

Ses şiddeti, ses gücü ile karıştırılmamalıdır. Referans değerleri ve desibel ile ifade edilmeleri ortaktır ama ses gücü, toplamda ses kaynağından çıkarak yayılan gücü ifade etmektedir, ses

şiddeti ise ses kaynağından çıkan sesin belirli bir mesafede yarattığı yoğunluk olarak tanımlanmaktadır.

### 3.1.3 Ses gücü

Ses kaynağı, etrafına ölçülebilir miktarda güç yaymaktadır. Gücün birimi Watt'tır. Eğer gücün spesifik yöneldiği bir bölge mevcut değilse ses kaynağı küresel olarak tanımlanır [11]. Ses şiddeti birim alana düşen güç miktarı olduğu için birim alan ses şiddeti ile çarpıldığında ses kaynağından çıkan güç elde edilmektedir.

$$\text{Ses gücü seviyesi } L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te yer alan  $W_0$  ifadesi referans ses gücüne karşılık gelmektedir ve  $10^{-12}$  W (Watt) olarak kullanılmaktadır [11].

### 3.1.4 Ses Hızı

Ses kaynağından çıkan ses dalgaları, kaynaktan dışarı olacak şekilde havaya dağılırlar, dağılma oranları dış ortamın yoğunluğuna ve esnekliğine bağlıdır. Bu değer yaklaşık olarak Eşitlik 3.6'da belirtilen formülden elde edilmektedir. Formülde yer alan  $P_s$  ifadesi atmosferik basıncı,  $\rho$  ise havanın yoğunluğunu belirtmektedir [11].

$$c = \sqrt{1.4 P_s / \rho} \quad (3.6)$$

Ses hızı pratik uygulamalarda sadece havanın sıcaklığına bağlıdır ve Eşitlik 3.7'de belirtilmiştir. Formülasyondaki T ifadesi Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık ifadesine karşılık gelmektedir. Örnek olarak, 20 derece için hesaplama yapıldığında 343.2 m/s değeri elde edilmiştir [11].

$$c = 20.05 \sqrt{T} \text{ m/s} \quad (3.7)$$

### 3.1.5 Dalga Boyu

Dalga boyu, ses dalgasının bir periyot boyunca ilerlediği mesafe olarak tanımlanmaktadır.  $f$  = frekans,  $T$  = periyot,  $c$  = ses hızı,  $\lambda$  = dalga boyunu ifade etmektedir.

$$\lambda = c \cdot T = c / f \text{ (metre)} \quad (3.8)$$

### 3.1.6 Ses İletim Kaybı

Ses dalgasının çarptığı yüzeyin yalıtım miktarını belirten bir özelliktir. Hesaplama logaritmik ifade kullanıldığı için birimi desibel ile ifade edilmektedir.

$$\text{İletim kaybı} = 10 \log_{10} \frac{W_1}{W_2} \text{ dB} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da belirtilen  $W_1$  ifadesi malzemenin üzerine düşen sesin sahip olduğu enerjisi,  $W_2$  ile belirtilen ifade malzemedan çıkarak iletilen sesin enerjisini belirtmektedir. Ses yalıtımının sağlandığı durumda  $\frac{W_1}{W_2}$  oranının büyük olması, yüzeyden çıkan sesin olabildiğince az olduğunu göstererek yalıtımın sağlandığını kanıtlamış olmaktadır [12].

### 3.1.7 Akustik Empedans

Ses dalgasının uyguladığı basınca yüzey tarafından gösterilen direnç, akustik empedans olarak tanımlanmaktadır. Malzeme yüzeyinde ilerleyen ses taneciklerinin hızı azaldığında malzemenin empedansının yüksek olduğu anlaşılacaktır. Empedansın birimi Newton saniye/metre<sup>3</sup> 'tür bu birim  $\text{kg/m}^2\text{sn}$  olarak da belirtilmektedir.

$$\text{Empedans} = Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da yer alan  $p$  ifadesi basıncı,  $v$  ses taneciklerinin hızını belirtmektedir. Eşitliğin sağ tarafında yer alan  $\rho$  ifadesi ortam yoğunluğunu,  $c$  ise sesin hızını belirtmektedir. Eşitlik 3.10 kullanılarak havanın empedansı yaklaşık olarak  $415 \text{ kg/m}^2\text{sn}$  hesaplanmaktadır [12]. Ses basıncının büyüklüğü ile ses partiküllerinin hızı birbirleriyle direkt olarak orantılıdır. Eşitlik 3.10'da görüldüğü gibi basıncın büyüklüğü arttıkça sesin ilerleme hızı artacaktır.

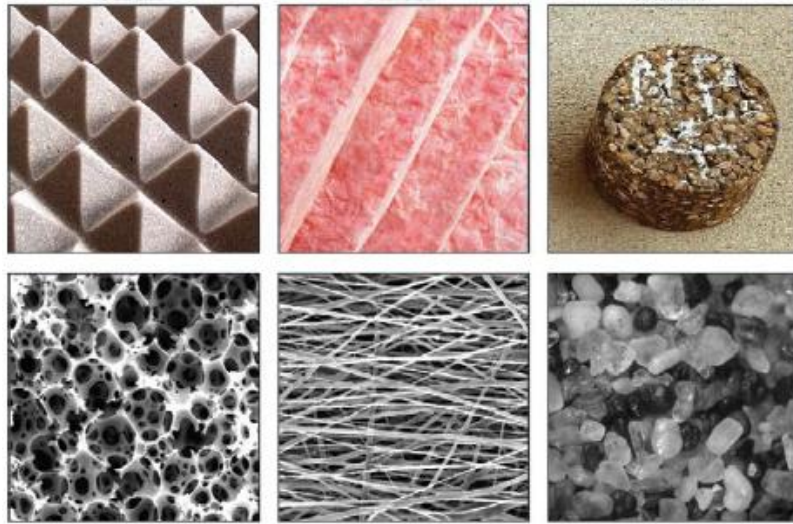
### 3.1.8 Ses Sönümlenme Katsayısı

Ses sönümlenme katsayısı ( $\alpha$ ), yüzeyde sönümlenen ses enerjisinin yüzeye çarpan sesin sahip olduğu toplam enerjiye oranından elde edilmektedir. Belirtilen katsayı, 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1 değerine eşit olması yüzeyin tamamen sönümleyici olduğunu, 0 olması ise yüzeyin tamamen yansıtıcı olduğunu göstermektedir [12].

### 3.2 Akustik Tasarımlarda Kullanılan Malzemeler

Ses sönümleyen malzemeler, üzerlerine çarpan ses enerjisinin çoğunu absorbe eder, sesin çok az bir kısmını yansıtırlar. Bu davranış sonucunda kullanılan malzeme hem ses yansıtıcı hem de ses soğurucu özellik göstermektedir. Malzemelerin ses soğurucu özellikleri gürültünün kontrol altında tutulması açısından oldukça faydalıdır. Sesi absorbe eden malzemeler çeşitli ortamlarda kullanılabilir. Örnek olarak, elektrik motorları gibi çalıştığında yüksek ses çıkaran ses kaynaklarının yakınlıklarına izolasyon sağlanabilir, ses bir ortamdan diğer ortama geçerken ilerlediği yol üzerine bariyerler olarak uygulanabilir veya sesin alıcı tarafına ses yalıtıcı malzeme uygulanabilir (kulaklık vb.). Çeşitli tiplerde ses yutucu malzemeler mevcuttur, bu malzemeler frekansa, malzemenin özelliklerine, malzeme kalınlığına, yüzeyin sonlandığı katmana bağlı olarak farklı seviyede sönümleme özelliği göstermektedirler. Genel olarak ses sönümleme katsayısı yüksek olan malzeme tipi, gözenekli malzemelerdir. Gözenekli malzemeler, ses dalgalarının malzeme içinden geçebilmesi için boşluklar, delikler veya kanallar içermektedir [13].

Gözenekli ses yutucu malzemeler hücreli, lifli, tanecikli olacak şekilde sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma, malzemelerin mikroskopik yapılarından elde edilmiştir [13].



Şekil 3.1. Sırasıyla hücreli, lifli ve tanecikli malzeme tipleri [13].

Ses dalgaları gözenekli malzeme içinde yer alan küçük delik ve açıklıklardan geçiş yapacaktır. Açık hücrelerden oluşturulmuş malzemelere örnek olarak köpük ve poliüretan verilebilir. Lifli malzemeler, malzeme liflerindeki boşluklar tarafından oluşturulan bir dizi tünel benzeri açıklıktan oluşur. Cam elyaf malzemesi lifli malzemeye örnektir. Tanecik



içeren gözenekli malzemeler için asfalt, gözenekli beton gibi malzemeler örnek verilebilir [13].

Gözenekli malzeme gelen ses dalgasına maruz kaldığında, malzemenin yüzeyindeki ve içindeki hava molekülleri titreşime zorlanır. Hava moleküllerinin sahip olduğu enerjinin bir kısmı, malzemenin içindeki tünellerin ve iç gözeneklerin olduğu yerlerde termal, viskoz (sürtünme) kayıpları nedeniyle ısı enerjisine dönüşecektir. Lifli malzemelerde enerjinin büyük bir kısmı, liflerde oluşan saçılım ve ses dalgasının titreşim etkisi ile liflerin birbirlerine sürtünmeleri sonucunda soğurulacaktır. Tanecikli malzeme tipinde ses sönümlene özelliği, sert gözenekli malzemelerdeki duruma oldukça benzemektedir. Malzemenin tanecikli yapısından kaynaklı olarak tanecikler arasında belirli boşluklar mevcuttur, sesin soğurulması tanecikleri ayıran boşluklar içinde yer alan havanın akışmazlığından elde edilmektedir. Malzeme tanecikli olduğundan dolayı saçılım etkisi de enerji kaybına ayrıca sebep olmaktadır [13].

Bu malzemelerin dışında, incelenecek örneklerden de görüleceği üzere alçıpan, cam yünü, plastik köpük gibi malzemeler de akustik çalışmalarında kullanılmaktadır [4, 6-8].

#### 4. TRANSFER MATRİS METODU ve ORTAMLARIN MATRİS ile GÖSTERİMİ

Akustik analizin temeli, sesin ortamda var oluşunu sağlamakla birlikte bulunduğu ortamda yayılmasını incelemeye dayanmaktadır. Bu bağlamda ses yansıtan ve sönümleyen yüzey tasarımıyla kullanılan malzemelerle oluşturulacak katmanlı yapıların davranışları incelenmektedir. Katmanlı yapılar katı, sıvı ve gözenekli malzemelerin farklı şekillerde dizilmesiyle oluşturulacaktır. Her bir ortamın özelliklerine bağlı olarak matris gösterimleri sağlanacaktır. Ortamda yer alan malzeme tipine bağlı olarak kullanılan parametreler farklılık gösterecektir. Bu farklılıklar ortamların özellikleri belirtilirken detaylandırılacaktır. Oluşturulacak model, farklı ortamlardaki dalga yayılımının transfer matrisler cinsinden gösterimine dayanmaktadır. Transfer matris, malzeme özelliklerine ve katman yapısına bağlı olarak elde edilir, bunun yanı sıra malzeme dizilimine bağlı olarak arayüz matrislerinin kullanımıyla katmanlı yapının belirli frekans aralığındaki davranışları da elde edilmektedir. Katmanlı yapı gösterimi Şekil 4.2’de belirtilmiştir [9].

Ortama çarpan ses dalgasına yüzeye gelen dalga denir, yüzeye çarptığı noktadan yansıyan ses dalgası yüzeye nüfuz edemeden ortamdan uzaklaşmıştır ve yansıyan dalga olarak adlandırılır. Ses dalgasının bir kısmı yüzey içerisinde sönümlenmektedir. Ses dalgasının yüzey içerisinde sönümlenmeden ilerleyen kısmı, yüzeyden transfer edilerek dış ortama aktarılacaktır. Bu dalgaya da iletilen dalga denir.

Ses dalgasının yüzeye açılı bir şekilde çarpması sonrası ilerlemesi esnasında, yüzeye teğet ve normal bileşenleri dikkate alınmaktadır. Şekil 4.2’de belirtildiği gibi,  $x_3$  ve  $x_1$  bileşenleri ses dalgasının ilerlediği yönleri belirtmektedir.  $x_1$  yüzey üzerinde ilerleyen dalganın,  $x_3$  ise yüzeye normal olarak ilerleyen dalganın yönünü göstermektedir. Belirli bir kalınlıktaki malzeme içerisinde ilerleyen herhangi bir dalga için dalga sayısının  $x_1$  bileşeni serbest havada ilerleyen dalganın  $x_1$  bileşenine eşittir [3].  $k$  değeri serbest havada ilerleyen dalga sayısına eşittir.  $\theta$  ses dalgasının yüzeye çarptığı açıyı belirtmektedir.  $k$  değeri, açısal hızın dalga hızına oranından elde edilmektedir.

$$W = 2\pi f \text{ (radyan/saniye) }, k_1 = k \cdot \sin(\theta) \quad (4.1)$$

Dalga sayısının birimi  $\text{metre}^{-1}$  olarak kabul edilmektedir. Belirli bir kalınlıktaki malzeme üzerine gelen ses dalgasının ilerlemesi transfer matris ile belirtilmektedir. Transfer matris ifadesi Şekil 4.2’de belirtilen ilk katman için  $\mathbf{V}(\mathbf{M}_1) = [\mathbf{T}] \mathbf{V}(\mathbf{M}_2)$  ile belirtilmektedir.  $\mathbf{M}_1$  ve

$M_2$  ile ifade edilen noktalar, malzemenin üst ve alt tabakasına yerleştirilmektedir.  $V(M_1)$  vektörünün bileşenleri,  $M_1$  noktasındaki akustik alanı belirleyen değişkenlerdir,  $V(M_2)$  ise benzer şekilde  $M_2$  noktasındaki değişkenlerden elde edilen bir vektördür. Vektör içinde yer alacak değişkenler malzemenin fiziksel özelliklerine ve kalınlığına bağlı olarak değişmektedir [9].

Ses dalgasının ilerleyişini açıklamak gerekirse A yüzeyi ses dalgasının yüzeye çarptığı bölgedir ve A bölgesinin yüzey empedansı, yüzeye çarpan ses basıncının ses partikülleri hızının normal bileşenine oranlanmasından elde edilir [3].

$$Z_A = p(A) / v_3(A) \quad (4.2)$$

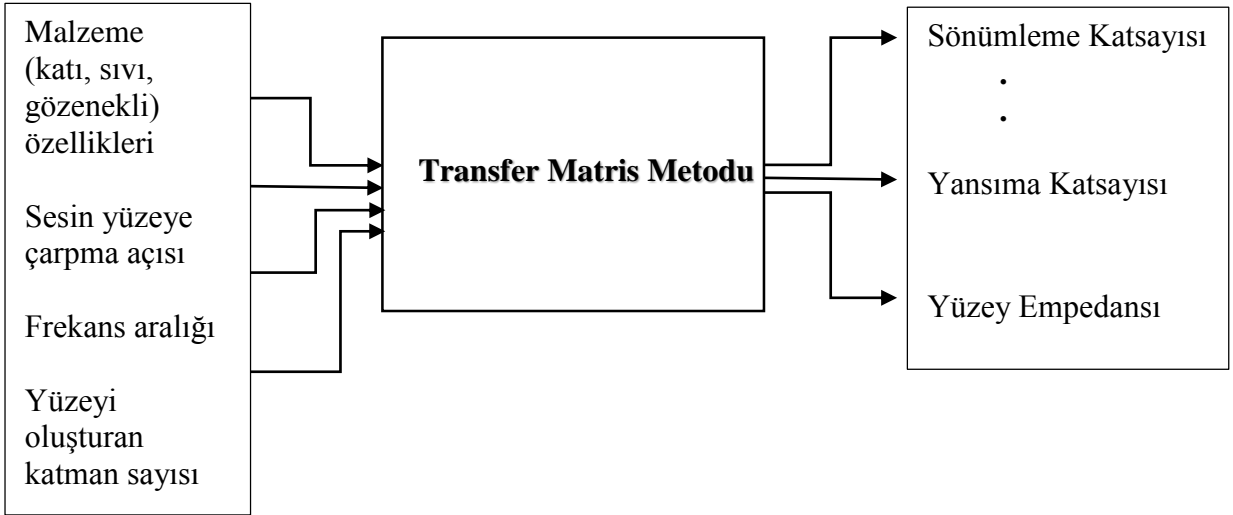
A bölgesinin akustik empedansını elde etmek amacıyla yüzeyin tipine bağlı olarak (katı, sıvı ve gözenekli malzeme) farklı değişkenler tanımlanır ve kullanılan malzeme için hesaplanan değişkenler yardımıyla transfer matris elde edilir. Transfer matris aracılığıyla da yüzey empedansına Bölüm 4.7’de belirtilen şekilde ulaşılır. Malzeme katmanlarının sonlandığı yerde hava olması sebebiyle havanın karakteristik empedans değeri ( $Z_C$ ) de sabit olduğundan B noktasındaki empedans değeri kolayca hesaplanmaktadır.

$$Z_B = Z_C / \cos(\theta) = p(B) / v_3(B) \quad (4.3)$$

Katmanlı yapı hava malzemesi dışında duvar gibi sert bir malzeme ile de sonlanabilir. Bu durumda matris hesaplamalarında farklılık olmaktadır ve bu durum Bölüm 4.6’da açıklanmaktadır.

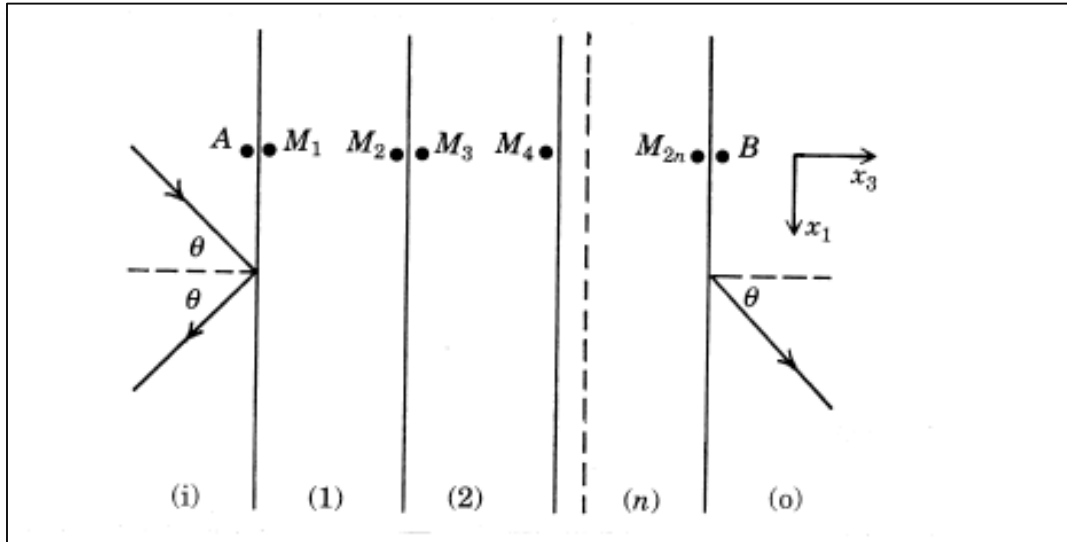
#### **4.1 Transfer Matris Metodu (TMM)**

Transfer Matris Metodu (TMM) katı, sıvı ve gözenekli malzemelerle oluşturulan katmanlı yapıları modellemek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bir katmanın transfer matrisi, malzemenin ön ve arka yüzündeki akustik alanları tanımlayan değişkenler ile ilişkilirken, arayüz matrisleri komşu katmanlar arasındaki sınır koşullarını bütünleştirmektedir. Komşu katmanlar aynı malzeme tiplerini içerebileceği gibi farklı malzeme tiplerini de içerebilmektedir. Malzemelerin transfer ve arayüz matrislerinin kullanımıyla, çok katmanlı ortamın akustik alan bilgilerine erişilme durumu basitleşmektedir.



Şekil 4.1. TMM için gerekli olan girdiler ve elde edilen çıktılar.

Malzeme tipi doğrultusunda, transfer matrisin elde edilmesine yönelik gerekli katsayılar MATLAB’da oluşturulan algoritmada tanımlanmaktadır. Bu katsayıların yanı sıra istenilen frekans aralığı, yüzeye çarpan ses dalgasının açısı değeri, yapının kaç katmandan oluşacağı ve bu katmanların hangi malzeme türlerini içereceğinin ayrıca programa girdi olarak eklenmesi gerekmektedir. Seçilen frekans aralığındaki her bir değer için hesaplanan akustik değişkenler çıktı olarak elde edilmektedir. TMM uygulanırken malzeme katmanlarının kalınlığı limitli, yanal boyutları sonsuz kabul edilmektedir [3].



Şekil 4.2. Çok katmanlı yapı gösterimi [9].

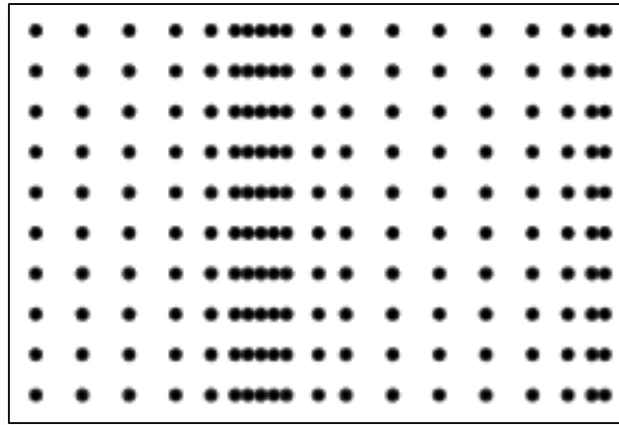
## 4.2 Katı Malzeme Ortam Özellikleri ve Matris Gösterimi

Katı malzeme içeren bir katmanda, ses dalgasının yüzey içerisinde ilerlemesi esnasında iki adet boyuna ilerleyen dalga, iki adette enine ilerleyen dalga oluşmaktadır. İkişer adet olarak belirtilme sebebi dalgaların birinin gelen dalga, ötekinin yansıyan dalga olmasıdır. Toplamda dört adet dalga mevcuttur. Bu sebeple malzeme içindeki akustik alanı ifade etmek amacıyla aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır. Denklemlerde yer alan dört farklı değişken dalgaların büyüklüğünü belirtmektedir. Eşitlik 4.4 ve 4.5'te yer alan  $\varphi$  boyuna ilerleyen dalganın potansiyelini,  $\psi$  ise enine ilerleyen dalganın potansiyelini belirtmektedir [3].

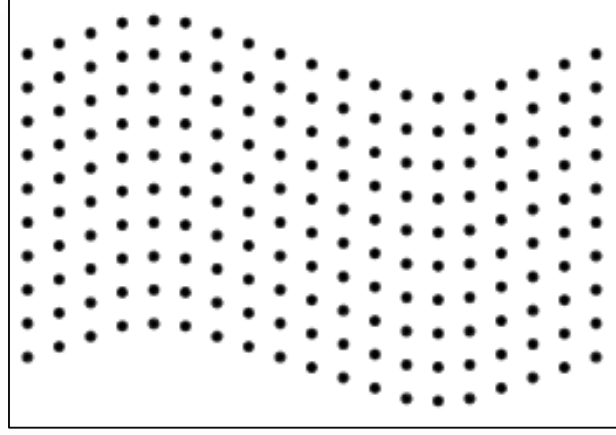
$$\varphi = [A_1 \exp(-jk_{p3}x_3) + A_2 \exp(jk_{p3}x_3)] \exp(j\omega t - jk_1x_1) \quad (4.4)$$

$$\psi = [A_3 \exp(-jk_{s3}x_3) + A_4 \exp(jk_{s3}x_3)] \exp(j\omega t - jk_1x_1) \quad (4.5)$$

Ses partiküllerinin boyuna ve enine dalga hareketleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bu noktada belirtilmesi gereken durum, dalganın ilerlediği yayılım yönü  $x_3$ 'tür, ancak enine veya boyuna ilerleme durumu partiküllerin ilerlerken nasıl bir yol çizdiğini belirtmektedir.



Şekil 4.3. Boyuna ilerleyen ses partiküllerinin hareketi.



Şekil 4.4. Enine ilerleyen ses partiküllerinin hareketi.

Dalgalar  $x_3$  yönünde ilerlemelerine rağmen  $x_1$  yönündeki dalga etkisi potansiyel ifadelerinde belirtilmiştir. Dalganın enine veya boyuna ilerlemesi  $x_1$  yönünde ilerleyen dalga sayısını değiştirmedikinden dolayı bu etki enine ve boyuna ilerleyen dalgadan çıkarılarak  $x_3$  yönünde ilerleyen dalga sayısı bulunur. Ancak bundan önce enine ve boyuna ilerleyen dalga sayılarını bulmak gerekmektedir [3].

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho}{\lambda + 2\mu}} \gg \text{Boyuna ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.6)$$

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho}{\mu}} \gg \text{Enine ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.7)$$

$$k_{p3} = \sqrt{\delta_1^2 - k_1^2} \gg x_3 \text{ yönünde ilerleyen boyuna dalga sayısı} \quad (4.8)$$

$$k_{s3} = \sqrt{\delta_3^2 - k_1^2} \gg x_3 \text{ yönünde enine dalga sayısı} \quad (4.9)$$

Formülasyonlarda yer alan değişkenleri açıklamak gerekirse dalga sayısının genel formülü bilindiği üzere  $k = \omega / c$  'dir. Bu formülde yer alan değişkenler daha önce belirtilmiştir ancak formülasyonun enine ve boyuna dalga sayıları için uyarlanması durumunda  $\delta_1 = \omega / c_p$ , burada belirtilen  $c_p$  ifadesi katı malzeme içerisinde ilerleyen boyuna dalga hızını belirtmektedir. Benzer şekilde enine ilerleyen dalga sayısı da  $\delta_3 = \omega / c_s$  ile ifade edilir ve  $c_s$  değişkeni katı malzeme içinde ilerleyen enine dalga hızını belirtmektedir [4].

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \gg \text{malzeme içerisinde ilerleyen boyuna dalga hızı} \quad (4.10)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \gg \text{malzeme içerisinde ilerleyen enine dalga hızı} \quad (4.11)$$

Katı malzemelerde ilerleyen ses dalgalarının hız denklemlerinde  $\lambda$  ve  $\mu$  Lamé katsayıları yer almaktadır. Katsayıların formülasyonları Eşitlik 4.12’de belirtilmiştir. Eşitlik 4.12’de yer alan E Young modülünü,  $\nu$  ise Poisson oranını belirtmektedir [3, 4].

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.12)$$

Young modülü, katı malzemenin sertliğini ölçmede kullanılan bir ifadedir. Katı malzemeye uygulanan kuvvet etkisi ile malzemenin elastikliği ölçüsünde, malzeme şeklinde değişim olur ancak kuvvet ortamdaki kalktığı anda malzeme tekrar eski haline dönmelidir eğer dönmüyorsa malzeme elastiklik özelliğini kaybetmiş demektir. Young modülünü bazı kaynaklar elastiklik modülü olarak da ifade etmektedir. Katı malzemeye uygulanacak olan kuvvetin birim alanda yarattığı etki strese karşılık, malzemenin kendini düzelteceği tersinir stres (basınç) veya gerilim olarak tanımlanmaktadır. Uygulanan stres sonrasında malzemenin boyunda bir değişim meydana gelir ve bu değişim miktarının, malzemenin ilk boyuna oranı gerilim miktarına eşit olur, bu doğrultuda malzemenin hacmi değişir. Uygulanan basıncın yönüne bağlı olarak malzeme uzar (çekme) veya kısalır (sıkıştırma). Malzemeye uygulanan stres miktarı artarsa buna bağlı olarak gerilim miktarı da artacaktır. Dolayısıyla malzemeye uygulanan stres ile gerilim miktarının doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bu durumu bir örnek üzerinden anlatmak gerekirse çelik bir malzeme kullanılsın ve bu çelik malzemenin yüzey alanına bir kuvvet uygulansın, bu durumda stres etkisiyle L uzunluğundaki elastik malzeme L+ $\Delta L$  olacaktır [14].

Birim alana uygulanan basınca karşılık malzemenin kendini düzeltmek için uyguladığı

$$\text{basınç} = \frac{F_R}{A} = \sigma = E \frac{\Delta L}{L} \quad (4.13)$$

Young modülünün birimi  $\frac{\Delta L}{L}$  (metre/metre) ifadesi birbirini götürdüğünden dolayı uygulanan basıncın birimi (Pa veya  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$ ) direkt olarak Young modülünün birimine eşit olacaktır. Uygulanan basınca göre uzama miktarı az olduğu için birim genellikle MPa veya GPa seviyelerinde olmaktadır. Genel olarak Young modülü E veya Y harfi ile belirtilir [14].

Gerilim altındaki katı malzeme uzadığında genişliği bir miktar azalır. Bu enlemsel inceleme sonucu malzemenin genişliğindeki değişimin orijinal genişliğine bölünmesinden enine gerilme miktarı bulunur. Enine gerilmenin boyuna gerilme miktarına oranlanmasından Poisson oranı elde edilir,  $\nu$  ile gösterilir.

Enine ve boyuna ilerleyen dalgaların potansiyel denklemlerinde belirtilen  $A_1, A_2, A_3, A_4$  büyüklüklerini bularak malzemenin akustik alanı hakkında yorum yapılabilmektedir. Ayrıca dört bilinmeyenli denklem sistemi ile transfer matris belirtilmektedir [3]. İfadede yer alan değişkenler mekanik değişkenlerdir.

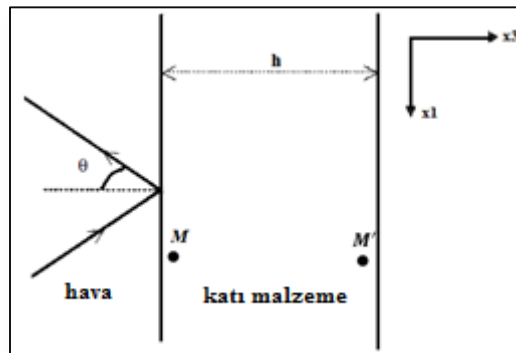
Transfer matris gösteriminde malzemenin üst yüzeyine yakın noktası ile alt yüzeyine yakın noktaları referans alınır.  $x_1$  ve  $x_3$  yönünde belirtilen noktalardaki hız bileşenleri bulunmakla birlikte ayrıca  $\sigma_{33}$  (yüzeye dik ilerleyen stres) ,  $\sigma_{13}$  (yüzeye teğet ilerleyen stres) bileşenleri yer almaktadır [4]. Malzemenin transfer matris gösteriminde malzeme tipi katı olduğundan dolayı “s” ifadesi eklenmiştir.

$$\begin{Bmatrix} v_1(M) \\ v_3(M) \\ \sigma_{33}(M) \\ \sigma_{13}(M) \end{Bmatrix} = T_s \begin{Bmatrix} v_1(M') \\ v_3(M') \\ \sigma_{33}(M') \\ \sigma_{13}(M') \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

Transfer matris, Eşitlik 4.18 ve 4.19’da belirtildiği gibi ortam kalınlığı bilgisiyle hesaplanmaktadır.

#### **Katı malzeme ortamı için transfer matris hesabı :**

Katı malzemelerin matris formu Eşitlik 4.15’te belirtildiği gibi, 4x4 boyutunda bir kare matristir [4]. Malzeme ortamı Şekil 4.5’te belirtilmiştir.



Şekil 4.5. Tek katmanlı malzeme ortamı [3].



$\Gamma(x_3) =$

$$\begin{bmatrix} Wk_1 \cos(k_{p3}x_3) & jWk_1 \sin(k_{p3}x_3) & jWk_{s3} \sin(k_{s3}x_3) & -Wk_{s3} \cos(k_{s3}x_3) \\ -jWk_{p3} \sin(k_{p3}x_3) & Wk_{p3} \cos(k_{p3}x_3) & Wk_1 \cos(k_{s3}x_3) & -jWk_1 \sin(k_{s3}x_3) \\ -D_1 \cos(k_{p3}x_3) & jD_1 \sin(k_{p3}x_3) & jD_2 k_{s3} \sin(k_{s3}x_3) & -D_2 k_{s3} \cos(k_{s3}x_3) \\ jD_2 k_{p3} \sin(k_{p3}x_3) & -D_2 k_{p3} \cos(k_{p3}x_3) & \mu(k_{s3}^2 - k_1^2) \cos(k_{s3}x_3) & -j\mu(k_{s3}^2 - k_1^2) \sin(k_{s3}x_3) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$D_1 = \lambda(k_1^2 + k_{p3}^2) + 2\mu k_{p3}^2 \quad (4.16)$$

$$D_2 = 2\mu k_1 \quad (4.17)$$

Malzemenin  $x_3 = 0$  ve  $x_3 = h$  noktasındaki  $\Gamma(x_3)$  değeri hesaplanır. Sonrasında Eşitlik 4.18 ve 4.19 ile malzemenin transfer matrisi hesaplanır [3, 4].

$$[T_s] = [\Gamma(x_3 = 0)] [\Gamma(x_3 = h)]^{-1} \quad (4.18)$$

$x_3 = h$  noktasından hesaplanan matrisin tersinin alınması kararsızlık yaratabileceğinden dolayı,  $x_3 = 0$  noktasından hesaplanan matrisin tersinin alınarak işlem yapılması daha kararlı sonuç verecektir [3].

$$[T_s] = [\Gamma(x_3 = -h)] [\Gamma(x_3 = 0)]^{-1} \quad (4.19)$$

### 4.3 Sıvı Malzeme Ortam Özellikleri ve Matris Gösterimi

Sıvı ortamlarda akustik alanı ifade etmek için malzemenin sınırlarındaki hız ve basınç değişkenlerinin  $x_3$  yönündeki bileşenleri kullanılmaktadır. Belirtilen basınç ifadesi bazı kaynaklarda stres diye de tanımlanabilmektedir. Malzeme sıvı olduğu için transfer matris gösterimine “ $f$ ” simgesi eklenmiştir [3, 4].

$$\begin{Bmatrix} p(M) \\ v_3(M) \end{Bmatrix} = T_f \begin{Bmatrix} p(M') \\ v_3(M') \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

$$V^f(M) = [T_f] V^f(M') \quad (4.21)$$

Sıvı ortamlarda sadece boyuna ilerleyen dalgalar mevcuttur. Enine ilerleyen dalgalar gözlenmez, dolayısıyla yüzeye gelen dalga sayısı malzeme ortamından geçen dalga sayısına ve yüzey üzerinde ilerleyen dalga sayısına eşit olacaktır [3, 4].

$$k = \frac{\omega}{c} \gg \text{serbest havada ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.22)$$

$$k_1 = k \cdot \sin \theta \gg x_1 \text{ yönünde (malzeme yüzeyinde) ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.23)$$

$$k_3 = \sqrt{k^2 - k_1^2} \gg x_3 \text{ yönünde ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.24)$$

Sıvı ortam içerisinde iki adet dalga vardır. Bunlardan biri  $x_3$  yönünde ilerleyen dalga, öteki ise ortam içerisinde yansıyan dalgadır [3].

$$p(x_3) = A_1 \exp(-jk_3 x_3) + A_2 \exp(jk_3 x_3) \quad (4.25)$$

$$v_3^f(x_3) = \frac{k_3}{\omega \rho} [ A_1 \exp(-jk_3 x_3) - A_2 \exp(jk_3 x_3) ] \quad (4.26)$$

Eşitlik 4.25 ve 4.26'dan anlaşılıyor ki sıvı ortamda ilerleyen dalga  $x_3$  yönünde ilerliyor,  $-x_3$  yönünde de yansıyan dalga olduğu görülüyor. " $x_3$ " noktasına bağlı olarak dalganın ilerlemesi için uygulanan basınç ve bu basınca bağlı olarak dalganın hızı değişmektedir. Bu noktada hıza etki eden değişkenler arasında sıvı ortamın yoğunluğu  $\rho$  ve ses frekansı  $f$  önemli faktörlerdir. Eşitlik 4.26'da belirtildiği gibi ortam yoğunluğu ve sesin frekansı değiştikçe ses dalgasının ilerleme hızı etkilenecektir. Sıvı ortamlara örnek olarak standart sıcaklık ve basınçta hava örnek verilmektedir [3, 4].

#### **Sıvı malzeme ortamı için transfer matris hesabı :**

Şekil 4.5'te belirtilen katmanlı yapının sıvı malzeme olduğu varsayıldığında, ortamın transfer matrisini hesaplamak için Eşitlik 4.27'de belirtilen 2x2 boyutundaki kare matris kullanılır [3].

$$[T_f] = \begin{bmatrix} \cos k_3 h & j \frac{\omega \rho}{k_3} \sin k_3 h \\ j \frac{k_3}{\omega \rho} \sin k_3 h & \cos k_3 h \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

#### 4.4 Gözenekli Malzeme Ortam Özellikleri ve Matris Gösterimi

Gözenekli malzeme, hem katı malzeme hem de sıvı malzeme içermektedir. Belirtilen sıvı malzeme, hava ile doyurulmuş gözenekleri belirtir, malzemenin katı kısmı da gözeneklerin yer aldığı çerçeve olarak ifade edilmektedir. Sesin böyle bir ortamda ilerlemesi ancak gözenekli ortamın sahip olduğu hava ve katı çerçevenin hareket ettiği bir model kapsamında tahmin edilebilmektedir. Biot Teori modeli, gözenekli malzeme çerçevesinin sertliğini hesaba katarak iki adet boyuna, bir adet enine ilerleyen dalgaların aynı anda malzeme içerisinde ilerleyebilmesini sağlamaktadır. Belirtilen modelde gözenekli yapıların izotropik olduğu dikkate alınacaktır. İzotropik olma özelliği, farklı yönlerde malzemenin yapısal özelliklerinin değişkenlik göstermediği anlamına gelmektedir (gözeneklerin malzeme içinde eşit dağıldığı ve gözeneklerin birbirleriyle bağlantılarının olduğu durumudur). Biot Teorisi kapsamında gözenekli malzeme içerisinde altı tane dalga yayılım göstermektedir. Hava ile doyurulmuş sıradan gözenekli malzeme içerisinde ilerleyen dalgaları, malzemenin titreşimi ve havada yayılan dalgalar oluşturmaktadır. Malzeme ortamında ileriye doğru yayılan dalgalar  $k_{13}, k_{23}, k_{33}$ , geriye doğru yayılan dalgalar  $k'_{13}, k'_{23}, k'_{33}$  ile belirtilmektedir [3].

$k_{13}, k_{23}$  = gözenekli malzeme içerisinde boyuna ilerleyen dalga sayıları

$k_{33}$  = gözenekli malzeme içerisinde enine ilerleyen dalga sayısı

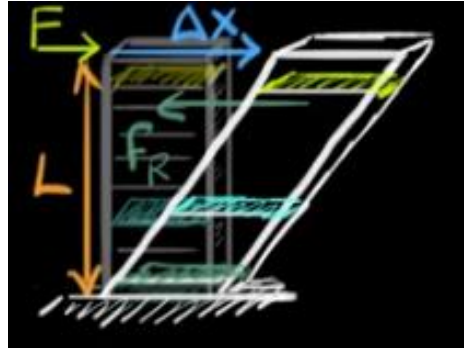
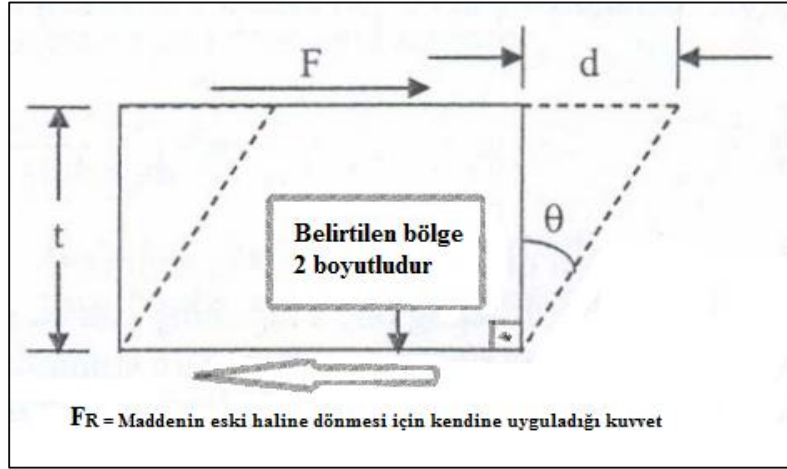
$k'_{13}, k'_{23}$  = gözenekli malzeme içerisinde boyuna ilerleyen dalgaların yansıyan dalga sayıları

$k'_{33}$  = gözenekli malzeme içerisinde enine ilerleyen dalganın yansıyan dalga sayısı

Gözenekli malzeme içerisinde ilerleyen ses dalgalarının yayılımı incelenirken TMM'den faydalanılacaktır ancak belirtmek gerekir ki TMM kullanıldığında, malzemenin kalınlığı dikkate alınacaktır diğer boyutlar sonsuz kabul edilecektir. Biot Teorisi'nin gözenekli malzemeye uygulanması için gereken özellikler, gözenekli malzemenin çerçeve kısmının elastiklik özelliği ve gözeneklerdeki hava akışıdır. Çerçeve kısmı Young modülü, kayma modülü, poisson oranı ile tanımlanır. Young modülü, kayma modülü katı malzemeler için sıklıkla kullanılan değişkenlerdir.

Kayma modülü, katılık modülü olarak da bilinmektedir. Kısaca değinmek gerekirse, birim alanda eksene paralel bir şekilde uygulanan kuvvet sonrasında, birbirine dik iki eksen arasında oluşan açıdaki değişim olarak tanımlanmaktadır. Açıya bağlı olarak da  $\Delta x$

kaymasının  $L$ 'ye oranı uygulanan kuvvet sonrasında gerinim miktarı olarak ortaya çıkmaktadır ve Şekil 4.6'da belirtilmiştir.



Şekil 4.6. Kayma modülü gösterimi [14].

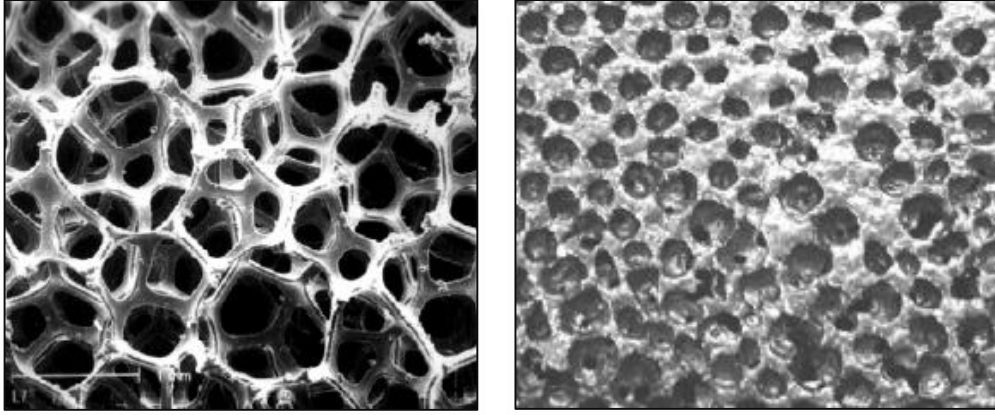
Belirtilmiş olan  $\theta$  farkı yüzeye paralel uygulanan basınç sonrası oluşmuştur. Yüzeydeki kayma gerilimi etkisiyle oluşan kayma geriniminin birbirine oranından kayma modülü elde edilmektedir. Kayma gerilimi ( $\frac{F_R}{A}$ ) ile kayma modülünün birimi aynıdır çünkü kayma gerinimi ( $\frac{\Delta x}{L}$ ) birimsizdir. Gerinim miktarının fazla olması uygulanan geriliminde fazla olduğunu gösterir, dolayısıyla malzemenin kendini eski haline çevirmesi için kendine uygulayacağı  $F_R$  değeri de direkt olarak  $F$  ile ilişkilidir [14].

$$\frac{F_R}{A} = G \frac{\Delta x}{L} \quad (4.28)$$

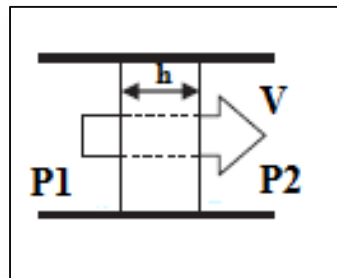
Eşitlik 4.28'de belirtilen  $G$  kayma modülünü göstermektedir.  $G$  değeri çok büyükse malzeme oldukça sert, kendi şeklini koruyor demektir. Bu duruma bağlı olarak, malzeme üzerinde deformasyon oluşturmak için oldukça büyük bir basınç ( $Newton/metre^2$ ) uygulanması gerekmektedir. Bu durumun tersi olarak  $G$  değeri çok küçükse, malzeme elastik ve kolayca

deforme oluyor anlamına gelmektedir. G değerinin bir de sıfıra eşit olma durumu vardır ki bunun anlamı malzemenin bir şekli olmadığını göstermektedir. Sıvı ve gaz malzemeler örnek verilebilmektedir. En elastik katı malzemenin bile kayma modülü asla 0 olamaz [14].

Belirtilen özelliklerin yanı sıra gözenekli malzemelerin kendine özgü akış direnci vardır. Akış direnci, gözenekli malzemenin sahip olduğu hava geçirgenliği özelliğine karşılık gelmektedir. Bu özellik hava akış direnci olarak da tanımlanmaktadır. Malzemenin hava akış direnci ne kadar büyük olursa hava geçirgenliği o kadar az olur dolayısıyla ses dalgaları malzeme içerisine giremez, ses sönümlenme malzeme içinde az miktarda olur. Hava akış direncinin küçük değerde olması durumunda, ses dalgasının malzeme ortamına girdikten sonra sahip olduğu enerjinin termal enerjiye dönüşüm verimliliği azalmaktadır. Bunun sonucunda da malzemenin ses sönümlenme özelliği zayıf olur [15]. Ses yutumunu daha iyi sağlamak için hava akış direnci optimum olan malzemeleri kullanmak önemlidir. Örneğin, gözenekli malzeme tiplerinde yer alan açık hücreli metal köpükler kapalı hücreli köpük malzemesine kıyasla, gözeneklerin birbirine bağlılığı ve pürüzlü gözenek yüzeyi sebebiyle daha uygun hava akış direncine sahip olur, buna bağlı olarak daha iyi ses yutum özelliği vardır.



Şekil 4.7. Açık ve kapalı hücreli köpük [15].



Şekil 4.8. Akış direncinin gösterimi [3].

Şekil 4.8’de gösterildiği gibi basınç düşüşünün, gözenekli malzeme tabakası boyunca yayılan havanın akış hızına oranı akış direncini vermektedir ve  $\sigma$  ile gösterilmektedir. Birimi  $Nm^{-4}s$ ’dir [3].

$$\sigma = \frac{(P1-P2)}{vh} \quad (4.29)$$

Eşitlik 4.29’da belirtildiği gibi  $v$  ortalama hava akışını,  $h$  malzeme kalınlığını,  $P1 - P2$  ise ortamlar arası basınç farkını göstermektedir. Açık hücreli köpük ve cam elyaf gibi malzemelerin akış direnç değerleri genel olarak 1000 ve 100000 arasındadır [3].

Gözenekli malzemelerin TMM’de kullanılacak parametrelerinden biri de gözenekliliktir. Cam elyaf ve plastik köpük gibi malzemeler havayla çevrilmiş olan elastik bir çerçeveden oluşmaktadır. Gözeneklilik, malzemenin toplam hacmine gözeneklerden kaynaklı hava hacminin oranından bulunmaktadır. Toplam hacimde yer alan hava, gözeneklilik katsayısından anlaşılmaktadır.

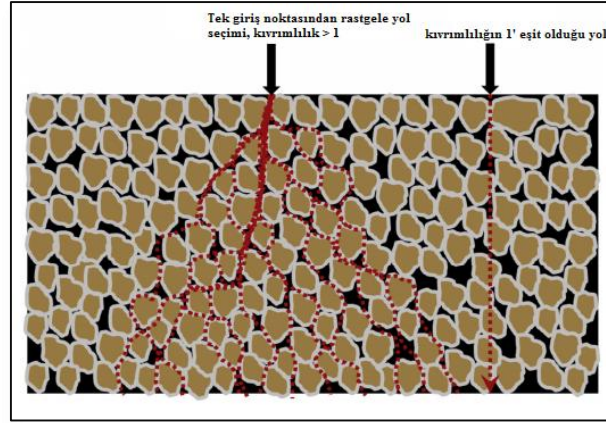
$$\phi = \frac{V_a}{V_T} \quad (4.30)$$

Eşitlik 4.30’da yer alan  $V_a$  havanın malzeme içindeki hacmini,  $V_T$  malzemenin toplam hacmini göstermektedir.  $V_b$  malzemenin katı çerçevesinin hacmi olarak varsayılırsa Eşitlik 4.31 yazılabilir [3].

$$V_a + V_b = V_T \quad (4.31)$$

Katı çerçeve içinde yer almayan havanın  $V_a$  hacminin içerisinde yer aldığı bilinmektedir. Bu ifade açık gözeneklilik veya bağlı gözeneklilik olarak bilinmektedir. Eğer hava, katı çerçeve içerisinde kapalı hücre olarak yer alıyorsa havanın olduğu gözenek, katı çerçevenin içinde yer alması sebebiyle  $V_b$  hacmine dahil edilmektedir. Çok sayıda lifli malzemelerin ve plastik köpüklerin gözeneklilik katsayısı 1 değerine yakındır. İlgili katsayı, hacimlerin oranından elde edildiği için birimi yoktur [3].

Kıvrımlılık özelliği, genellikle gözenekli malzeme içindeki gerçek akış yolu uzunluğunun, akış yolunun uçları arasındaki düz mesafeye oranı olarak tanımlanmakta olup,  $\alpha$  ile gösterilmektedir [16].

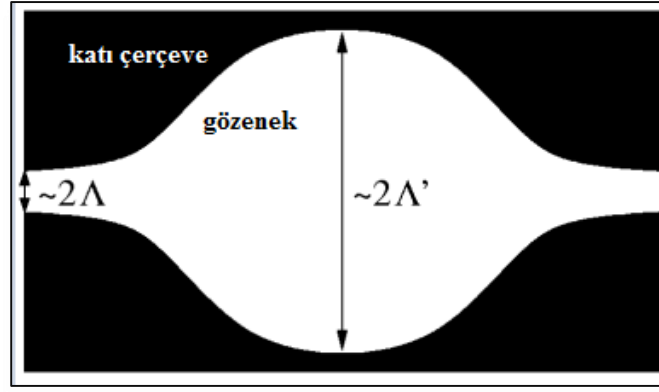


Şekil 4.9. Gözenekli malzemedeki kıvrımlılık durumu [16].

Viskozite karakteristik uzunluğu, orta ve yüksek akustik frekanslarda viskoz (akışkan olmayan) etkisini tanımlamak için kullanılan bir değişkendir. Literatürde, viskozite karakteristik uzunluğu  $\Lambda$  ile belirtilir. Gözenekli malzeme yapısındaki sıvının statik akışından dolayı gözeneğin yüzeyindeki sıvı hızının integrali alınacaktır. Denklemin pay kısmında belirtilen ifade ise gözeneğin içindeki hıza karşılık gelmektedir. Eşitlik 4.32'de belirtildiği gibi gözeneğin hacmi üzerinden integral alınmaktadır. Sadece gözenekli malzeme çerçevesinin geometrisine bağlıdır [3].

$$\Lambda = 2 \frac{\int v_i^2(\text{gözenek içi sıvı})dV}{\int v_i^2(\text{yüzeydeki akışkan sıvı})dA} \quad (4.32)$$

Gözenekli malzemeler, gözeneklerden ve gözenekleri birbirine bağlayan ara bağlantılardan oluşmaktadır. Akışmazlık etkisinin genel olarak oluştuğu bölgeler, gözenekleri birbirine bağlayan bağlantı yerleridir (ses dalgasının ilerleyeceği en küçük alandır). Sonuç olarak viskozite karakteristik uzunluğu, yaklaşık olarak gözeneklerin birbirine bağlandıkları yerin yarıçapı değerine eşit olmaktadır. Genel olarak akustik malzemelerin viskozite karakteristik değeri 11-350 mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) aralığındadır [17].



Şekil 4.10. Termal ve viskozite karakteristik uzunluğu [17].

Termal karakteristik uzunluğu  $\Lambda'$  ile gösterilmektedir. Bu özellik genel olarak gözenek boyutuna bağlıdır ve direkt olarak ölçülemez. Yaklaşık olarak tahmini değerler elde edilmektedir. Küresel bir gözenek düşünülürse gözenek termal karakteristik uzunluğu yaklaşık olarak gözenek yarıçapına eşit alınmaktadır. Değişkenler uzunluk olduğu için birimleri metre'dir. Şekil 4.10'da çap uzunluğu belirtildiğinden termal ve viskozite uzunluğu sırasıyla  $2\Lambda'$  ve  $2\Lambda$  olarak gösterilmiştir [17].

Gözenekli malzemenin kullanıldığı ortam Şekil 4.12'de belirtildiği gibi düşünüldüğünde, transfer matris gösteriminde altı adet değişken tanımlanmaktadır. Gözenekli ortam içerisinde daha önce belirtildiği gibi altı adet dalga mevcuttur. Ortam içerisinde üç adet dalga ilerler (2 dalga boyuna, 1 dalga enine),  $M'$  sınırına gelindiğinde ilerleyen dalgaların yansımından dolayı üç adet yansıyan dalga oluşmaktadır. Matris formunda belirtilen değişkenler birbirinden bağımsızdır ve malzemenin sınırlarındaki akustik alan hakkında bilgi vermektedir. Ses dalgalarının ilerleme yönü  $x_3$ 'tür. Matris değişkenleri içerisindeki  $v_1^s(M)$ ,  $v_3^s(M)$  katı çerçevenin,  $v_3^f(M)$  ise malzeme içindeki sıvının hız parametresidir. Diğer değişkenler  $\sigma_{33}^s(M)$ ,  $\sigma_{13}^s(M)$ ,  $\sigma_{33}^f(M)$  sırasıyla, katı çerçevenin maruz kaldığı normal ekseninde gelen stres, teğet ekseninde uygulanan stres, son değişken ise sıvı ortamın maruz kaldığı normal ekseninde uygulanan stresi belirtmektedir. Malzeme gözenekli olduğu için transfer matris değişkeninin gösterimine "p" simgesi eklenmiştir [3, 4].

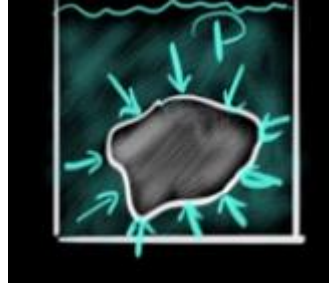
$$\begin{Bmatrix} v_1^s(M) \\ v_3^s(M) \\ v_3^f(M) \\ \sigma_{33}^s(M) \\ \sigma_{13}^s(M) \\ \sigma_{33}^f(M) \end{Bmatrix} = T_p \begin{Bmatrix} v_1^s(M') \\ v_3^s(M') \\ v_3^f(M') \\ \sigma_{33}^s(M') \\ \sigma_{13}^s(M') \\ \sigma_{33}^f(M') \end{Bmatrix} \quad (4.33)$$



TMM'nin kullanılması için dalga sayılarının bulunması gerekmektedir. Dalga sayılarının bulunabilmesi için elastiklik (esneklik) katsayılarının bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Biot Teorisi tarafından sağlanan elastiklik katsayıları P, Q, N ve R ile gösterilir. N katsayısı gözenekli malzemenin katı çerçevesinin sahip olduğu kayma modülüdür [18].

Katı malzemelerin basınç altındaki sıkışma ölçüsüne hacim modülü veya sıkışmazlık denilmektedir. Buradaki temel durum malzemeye her yönden basınç uygulanması durumudur. Bilindiği üzere katı malzemelerin hacim modülü sıvı ve gazlardan daha büyüktür. Bu durumun sonucunda, gazlar en çok sıkıştırılabilen malzemelerdir, en az sıkıştırılan malzemeler de katılardır. Hacimdeki değişim  $\Delta V$ , maddenin gerçek hacmi ise V ile gösterilir. Hacimsel modülün birimi Pascal'dır [14].

$$K = \frac{\text{Uygulanan basınç (Pascal)}}{\Delta V/V} \quad (4.34)$$



Şekil 4.11. Malzemeye uygulanan basınç gösterimi [14].

Biot Teorisi, gözenekli malzeme içinde ilerleyen dalga sayılarının, gözenekli malzemenin elastik katsayılarının, eylemsizlik parametrelerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Hesaplamalara yönelik gerekli olacak denklemler aşağıda belirtilmiştir.

$$P = \frac{4}{3}N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi} K_f \quad (4.35)$$

Eşitlik 4.35 – 4.39 arasında belirtilen denklemlerde N gözenekli malzeme çerçevesinin kayma modülü,  $K_b$  malzeme çerçevesinin sabit hava basıncındaki hacimsel modülü,  $K_f$  gözenekler içindeki havanın hacimsel modülüdür.  $\phi$  gözeneklilik katsayısıdır [4, 7].

$$Q = K_f (1 - \phi) \quad (4.36)$$

$$R = \phi K_f \quad (4.37)$$

$$K_b = \frac{2N(\nu+1)}{3(1-2\nu)}, \text{ formülasyonda yer alan } \nu \text{ poisson oranıdır.} \quad (4.38)$$

$$K_f = \frac{P_0}{1 - \frac{(\gamma-1)}{\gamma\alpha'(\omega)}}, \text{ formülünde yer alan } \alpha'(\omega) \text{ katsayısı termal değişim için kullanılır.} \quad (4.39)$$

$K_f$  formülünde yer alan  $\alpha'(\omega)$  katsayısının bulunması için Champoux-Allard modeli kullanılmaktadır [3].

$$\alpha'(\omega) = \frac{8v'}{j\omega\Lambda'^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\Lambda'}{4}\right)^2 \frac{j\omega}{v'}} + 1 \quad (4.40)$$

$\Lambda'$  katsayısı termal karakteristik uzunluğu,  $\gamma$  havanın özgül ısı oranını,  $P_0$  atmosferik basıncı belirtmektedir.  $v'$  katsayısı ise havanın kinematik viskozite değerinin Prandtl sayısına bölünmesinden elde edilen katsayıdır.

Biot Teorisi kapsamında çerçeve ile sıvı arasında eylemsizlik etkileşimi oluşmaktadır. Oluşan eylemsizlik parametreleri ve gerekli olacak denklemler Eşitlik 4.41 – 4.45 arasında belirtilmiştir [3]. Değişkenler tamamen malzemenin geometrisine, yapısına ve sıvı (hava) yoğunluğuna bağlıdır.

$$\rho_{11} = \rho_1 + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (4.41)$$

$$\rho_{12} = -\rho_a + j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (4.42)$$

$$\rho_{22} = \phi\rho_0 + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (4.43)$$

$$\rho_a = \rho_0\phi(\alpha(\omega) - 1) \quad (4.44)$$

$$G(\omega) = \sqrt{1 + \left(\frac{2\alpha_\infty q_0}{\phi\Lambda}\right)^2 \frac{j\omega}{v}} \quad (4.45)$$

Eşitlik 4.41 - 4.45'te yer alan değişkenleri açıklamak gerekirse  $\rho_1$  gözenekli malzemenin çerçevesinin yoğunluğu,  $\rho_0$  havanın yoğunluğu,  $\phi$  gözenekliliği,  $\alpha_\infty$  kıvrımlılığı,  $\sigma$  akış direncini,  $\omega$  açısal hızı,  $\Lambda$  viskozite karakteristik uzunluğu belirtmektedir.  $v$  ile tanımlı olan değişken ise havanın kinematik viskozite değeridir. Dinamik kıvrımlılık ise  $\alpha(\omega)$  ile gösterilmekte olup, Eşitlik 4.46 ile elde edilmektedir. Belirtilen katsayının bulunmasında Johnson modeli kullanılmaktadır [3, 7].

$$\alpha(\omega) = \frac{v\phi}{j\omega q_0} G(\omega) + \alpha_\infty \quad (4.46)$$

Transfer matris hesabında kullanılacak bir diğer değişken ise enine ve boyuna ilerleyen dalga sayıdır. Dalga sayılarına yönelik gerekli olacak denklemler, Eşitlik 4.47 – 4.53 arasında belirtilmiştir [3].

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Delta}] \gg \text{boyuna dalga 1} \quad (4.47)$$

$$\delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} + \sqrt{\Delta}] \gg \text{boyuna dalga 2} \quad (4.48)$$

$$\delta_3^2 = \frac{\omega^2}{N} \left( \frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{22}} \right) \gg \text{enine dalga} \quad (4.49)$$

$$\Delta = [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12}]^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2) \quad (4.50)$$

$$k_t = \frac{\omega \sin(\theta)}{c} \gg \text{tüm katmanlar için aynı olan yüzeye teğet ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.51)$$

Enine ve boyuna ilerleyen dalga sayılarından  $x_1$  yönünde yüzey üzerinden ilerleyen dalga sayısı çıkarılarak  $x_3$  yönünde ilerleyen dalga sayıları bulunur.

$$k_{i3} = \sqrt{(\delta_i^2 - k_t^2)} \quad , \quad i=1, 2, 3 \gg x_3 \text{ yönünde ilerleyen dalga sayısı} \quad (4.52)$$

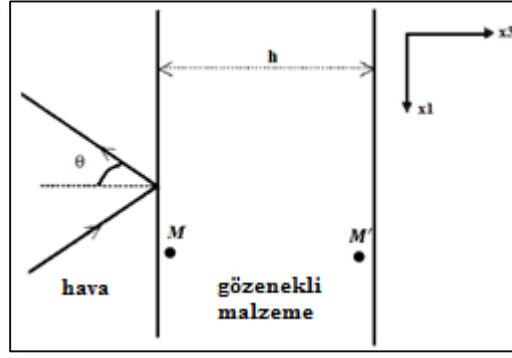
$$k'_{i3} = -k_{i3} \quad , \quad i=1, 2, 3 \gg x_3 \text{ yönünde ilerledikten sonra } M' \text{ dan yansıyan dalga sayısı} \quad (4.53)$$

$$\mu_i = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2\rho_{11}}{\omega^2\rho_{12} - Q\delta_i^2} \quad , \quad i=1, 2 \text{ (boyuna dalga için hava hızının çerçeve hızına oranını verir [3].)} \quad (4.54)$$

$$\mu_3 = -\frac{\rho_{12}}{\rho_{22}} \quad , \quad (\text{Havanın ve çerçevenin yer değiştirme genliklerinin oranıdır.}) \quad (4.55)$$

### **Gözenekli malzeme ortamı için transfer matris hesabı :**

$x_3 = h$  kalınlıklı bir gözenekli malzemenin transfer matrisi hesaplanırken Eşitlik 4.58'de belirtilen, 6x6 boyutunda kare matris ile işlem yapılmaktadır. Eşitlik 4.58'in bulunabilmesi için Eşitlik 4.56 ve 4.57'de yer alan denklemlerin, matrisin ilgili yerlerine eklenmesi gerekir [4].



Şekil 4.12. Tek katmanlı gözenekli malzeme ortamı [3].

$$D_i = (P + Q\mu_i)(k_t^2 + k_{i3}^2) - 2Nk_t^2, \quad i = 1,2 \quad (4.56)$$

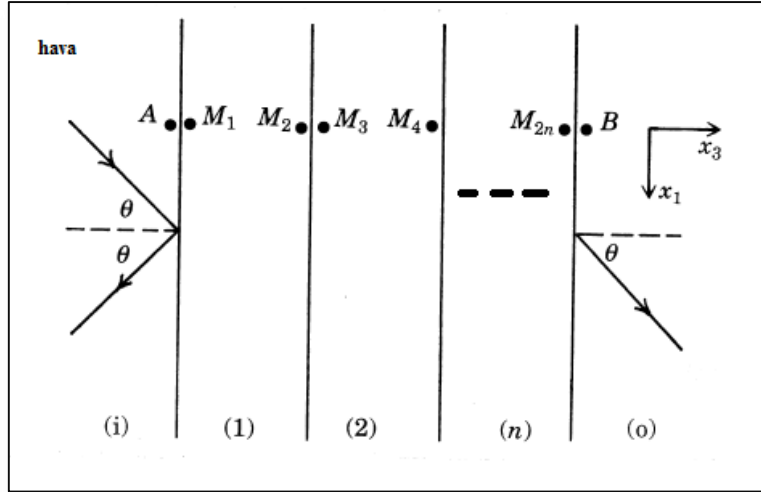
$$E_i = (R\mu_i + Q)(k_t^2 + k_{i3}^2), \quad i = 1,2 \quad (4.57)$$

$$[\Gamma(x_3)] = \begin{bmatrix} \omega k_t \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{13}x_3) & \omega k_t \cos(k_{23}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{23}x_3) & j\omega k_{33} \sin(k_{33}x_3) & -\omega k_{33} \cos(k_{33}x_3) \\ -j\omega k_{13} \sin(k_{13}x_3) & \omega k_{13} \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_{23} \sin(k_{23}x_3) & \omega k_{23} \cos(k_{23}x_3) & \omega k_t \cos(k_{33}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{33}x_3) \\ -j\omega k_{13} \mu_1 \sin(k_{13}x_3) & \omega k_{13} \mu_1 \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_{23} \mu_2 \sin(k_{23}x_3) & \omega k_{23} \mu_2 \cos(k_{23}x_3) & \omega k_t \mu_3 \cos(k_{33}x_3) & -j\omega k_t \mu_3 \sin(k_{33}x_3) \\ -D_1 \cos(k_{13}x_3) & jD_1 \sin(k_{13}x_3) & -D_2 \cos(k_{23}x_3) & jD_2 \sin(k_{23}x_3) & 2jNk_t k_{33} \sin(k_{33}x_3) & -2Nk_t k_{33} \cos(k_{33}x_3) \\ 2jNk_t k_{13} \sin(k_{13}x_3) & -2Nk_t k_{13} \cos(k_{13}x_3) & 2jNk_t k_{23} \sin(k_{23}x_3) & -2Nk_t k_{23} \cos(k_{23}x_3) & N(k_{33}^2 - k_t^2) \cos(k_{33}x_3) & -jN(k_{33}^2 - k_t^2) \sin(k_{33}x_3) \\ -E_1 \cos(k_{13}x_3) & jE_1 \sin(k_{13}x_3) & -E_2 \cos(k_{23}x_3) & jE_2 \sin(k_{23}x_3) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

$[T_p] = [\Gamma(0)][\Gamma(h)]^{-1}$  ile transfer matris hesabı gerçekleştirilir. Ancak daha önce Eşitlik 4.19'da belirtildiği gibi  $x_3 = h$  değişkeninin yazıldığı matrisin tersini almak yerine  $x_3 = -h$  yazılarak  $[T_p] = [\Gamma(-h)][\Gamma(0)]^{-1}$  hesabının yapılması daha uygundur.

#### 4.5 Birbirine Bağlantılı, Çok Katmanlı Yapıların Transfer Matris Hesabı

Malzeme tipine bağlı olarak tek katmanlı yapılar için transfer matris hesabı Bölüm 4.2 – 4.4'te yer almaktadır. Bu kısımda tek katmanlı yapıdan ziyade birbirine eklenerek birden fazla katmandan oluşan yapıların transfer matris hesabı açıklanacaktır. Bahsedilen katman yapısı Şekil 4.13'te belirtilmiştir. Katmanlı yapılarda sınırlar önemlidir. Örneğin,  $M_2$  ve  $M_3$  yazan bölge incelendiğinde kullanılan malzemenin tipine göre arayüz matrisi belirlenecektir. Arayüz matrisleri, sınır koşullarına bağlı olarak akustik alan vektörlerini kullanmaktadır.



Şekil 4.13. Birbirine bağlantılı, çok katmanlı malzeme yapısı [9].

Birbirine bitişik katmanlardaki malzemeler katı-katı, sıvı-sıvı veya gözeneklilik katsayısı aynı olan gözenekli malzemelerden oluşuyorsa, katmanlı yapının genel transfer matrisi iki katmanın transfer matrislerinin çarpımından elde edilir. Eğer bitişik katmanlar gözeneklilik katsayısı farklı olan gözenekli malzemeleri içeriyorsa, katmanların gözeneklilik katsayısı önemli olacaktır ve katmanların transfer matrislerinin doğrudan çarpımı ile genel transfer matris hesaplanamayacaktır [3].

Gözeneklilik katsayısı farklı olan malzemelerin yer aldığı, bitişik iki katmandaki  $M_2$  ve  $M_3$  noktaları için akustik alan vektörlerinde tanımlı değişkenler ile sınır denklemleri yazılır. Eşitlik 4.59 – 4.64 arasındaki denklemler kullanılarak gözenekli malzemelerin arayüz matrisi oluşturulmaktadır [3].

$$V_1^s(M_2) = V_1^s(M_3) \quad (4.59)$$

$$V_3^s(M_2) = V_3^s(M_3) \quad (4.60)$$

$$\phi_1 \left( V_3^f(M_2) - V_3^s(M_2) \right) = \phi_2 \left( V_3^f(M_3) - V_3^s(M_3) \right) \quad (4.61)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) + \sigma_{33}^f(M_2) = \sigma_{33}^s(M_3) + \sigma_{33}^f(M_3) \quad (4.62)$$

$$\sigma_{13}^s(M_2) = \sigma_{13}^s(M_3) \quad (4.63)$$

$$\frac{\sigma_{33}^f(M_2)}{\phi_1} = \frac{\sigma_{33}^f(M_3)}{\phi_2} \quad (4.64)$$

$$[I_{pp}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \frac{\phi_2}{\phi_1}) & \frac{\phi_2}{\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & (1 - \frac{\phi_1}{\phi_2}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\phi_1}{\phi_2} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

Gözeneklilik katsayıları farklı olan malzemelerden oluşan bitişik yapıdaki iki katmanın transfer matris hesabı için Eşitlik 4.66 kullanılmaktadır. Gözenekli malzemelerde gözeneklilik değişkeninin farklılığından dolayı arayüz matrisi direkt olarak birim matrise eşit olamamaktadır. Eğer gözeneklilik katsayısı aynı olan gözenekli malzemeler, katı-katı veya sıvı-sıvı malzemeler kendi aralarında bitişik olarak katmanlı yapıda yer alıyorsa arayüz matrisleri birim matrise eşit olmaktadır. Birim matris çarpma işleminde etkisiz olacağından direkt olarak malzemelerin transfer matrislerinin çarpılması genel transfer matrisin hesaplanması konusunda yeterli olacaktır [3].

$$[T^p] = [T_1^p][I_{pp}][T_2^p] \quad (4.66)$$

Eğer çok katmanlı yapıdaki malzeme sıralaması farklı tipteki malzemeleri içeriyorsa, sınır koşullarının denklemlerine bağlı olarak farklı arayüz matrisleri kullanılacaktır.

### **Katı-Sıvı Malzeme Arayüzü**

Sınır koşul denklemleri ;

$$V_3^s(M_2) = V_3^f(M_3) \quad (4.67)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) = -p(M_3) \quad (4.68)$$

$$\sigma_{13}^s(M_2) = 0 \text{ (sıvı malzemede enine dalga ilerlemesi gözlenmemektedir.)} \quad (4.69)$$

$[I_{sf}]V^s(M_2) + [J_{sf}]V^f(M_3) = 0$  denkleminde yerine koyulduğunda, elde edilen arayüz matrisleri Eşitlik 4.70'te belirtilmiştir [3, 4].

$$[I_{sf}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [J_{sf}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Bahsi geçen  $[I_{sf}]$  ve  $[J_{sf}]$  matrisleri sırasıyla  $[J_{fs}]$  ve  $[I_{fs}]$  'ye eşit olmaktadır. Matrislerde belirtilen "fs" sıvı malzemeden katı malzemeye geçiş arayüzünü, "sf" ise katı malzemeden sıvı malzemeye geçişi belirtmektedir [3].

## Gözenekli – Sıvı Malzeme Arayüzü

Sınır koşul denklemleri ;

$$(1 - \phi)V_3^s(M_2) + \phi V_3^f(M_2) = V_3^f(M_3) \quad (4.71)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) = -(1 - \phi)p(M_3) \quad (4.72)$$

$$\sigma_{13}^s(M_2) = 0 \quad (4.73)$$

$$\sigma_{33}^f(M_2) = -\phi p(M_3) \quad (4.74)$$

$[I_{pf}]V^p(M_2) + [J_{pf}]V^f(M_3) = 0$  denkleminde yerine koyulduğunda, elde edilen arayüz matrisleri Eşitlik 4.75'te belirtilmiştir [3, 4].

$$[I_{pf}] = \begin{bmatrix} 0 & (1 - \phi) & \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [J_{pf}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ (1 - \phi) & 0 \\ 0 & 0 \\ \phi & 0 \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

Bahsi geçen  $[I_{pf}]$  ve  $[J_{pf}]$  matrisleri sırasıyla  $[J_{fp}]$  ve  $[I_{fp}]$ 'ye eşit olmaktadır. Matrislerde belirtilen “*pf*” gözenekli malzemeden sıvı malzemeye geçiş arayüzünü, “*fp*” ise sıvı malzemeden gözenekli malzemeye geçişi belirtmektedir [3].

## Katı – Gözenekli Malzeme Arayüzü

Sınır koşul denklemleri ;

$$V_1^s(M_2) = V_1^s(M_3) \quad (4.76)$$

$$V_3^s(M_2) = V_3^s(M_3) \quad (4.77)$$

$$V_3^s(M_2) = V_3^f(M_3) \quad (4.78)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) = \sigma_{33}^s(M_3) + \sigma_{33}^f(M_3) \quad (4.79)$$

(Eşitlik 4.79'da belirtildiği gibi gözenekli malzemelerin hem katı hem sıvı bileşeni olduğu unutulmamalıdır.)

$$\sigma_{13}^s(M_2) = \sigma_{13}^s(M_3) \quad (4.80)$$

$[I_{sp}]V^s(M_2) + [J_{sp}]V^p(M_3) = 0$  denkleminde yerine koyulduğunda, elde edilen arayüz matrisleri Eşitlik 4.81'de belirtilmiştir [3, 4].

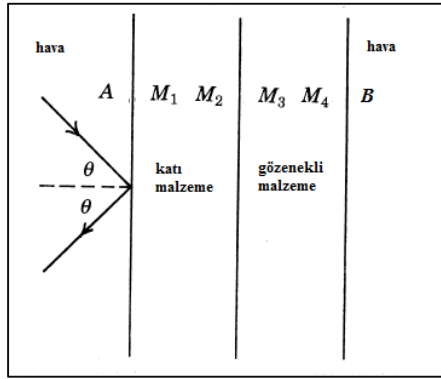
$$[I_{sp}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [J_{sp}] = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

Bahsi geçen  $[I_{sp}]$  ve  $[J_{sp}]$  matrisleri sırasıyla  $[I_{ps}]$  ve  $[I_{ps}]$  'ye eşit olmaktadır. Matrislerde belirtilen “sp” katı malzemedan gözenekli malzemeye geçiş arayüzünü, “ps” ise gözenekli malzemedan katı malzemeye geçişi belirtmektedir [3].

#### 4.6 Genel Transfer Matris Hesabı

Çok katmanlı yapıların tasarımında farklı tipte malzemeler yer alabilir. Bu duruma bağlı olarak malzeme ortamında yer alan her bir katmanın transfer matrislerinin direkt olarak birbiriyle çarpılması genel transfer matrisin hesaplanmasında kullanılamaz, sebebi de arayüz matris boyutlarının çeşitlilik göstermesidir.

Örnek olarak, Şekil 4.14'te belirtilen yapının 1. katmanında katı malzeme, 2. katmanında ise gözenekli malzeme olması durumu incelendiğinde,



Şekil 4.14. İki katmanlı yüzey gösterimi.

$[I_{sp}]V^s(M_2) + [J_{sp}]V^p(M_3) = 0$ , denklemdeki ilk kısım katı katman, ikinci kısım ise gözenekli malzeme için yazılmıştır.

$V^p(M_3) = [T^p]V^p(M_4)$ , eşitliği gözenekli malzemenin bulunduğu katmanın transfer matrisini belirtmektedir. Yukarıdaki denklemde  $V^p(M_3)$  yerine  $[T^p]V^p(M_4)$  koyulduğunda eşitlik  $[I_{sp}]V^s(M_2) + [J_{sp}][T^p]V^p(M_4) = 0$  denklemine dönüşmektedir. Belirtilen denklemle  $M_2$  ve  $M_4$  arasındaki akustik iletim ifade edilmiş olur.



Yazılan denklem genel olarak ifade edildiğinde, Şekil 4.13 göz önüne alınarak ses dalgasının çarptığı en dış katmanın hava olduğu düşünülerek denklem eşitlikleri yazılır. Eşitlikler katman yapısının çeşitliliğine göre farklılık gösterecektir [3].

- $[I_{f1}]V(A) + [J_{f1}][T^{(1)}]V(M_2) = 0$  , dış ortamdan 1.katmana geçiş (4.82)

- $[I_{(m)(m+1)}]V(M_{2m}) + [J_{(m)(m+1)}][T^{(m+1)}]V(M_{2(m+1)}) = 0$  ,  $m= 1,2,\dots,n-1$  , ara katmanlardaki ilerleyiş (4.83)

- $[I_{(n,o)}]V(M_{2n}) + [J_{(n,o)}]V(B) = 0$  , n. katmandan en dışta yer alan B ortamına geçiş (4.84)

Katmanlardan elde edilen denklem setleri  $D$  matrisine yerleştirilecektir.  $D$  matrisini daha sade yazmak adına denklem setleri sadeleştirilmiş bir şekilde belirtilecektir.

$V_D$  ve  $D$  sırasıyla Eşitlik 4.85 ve 4.87’de açıklanmıştır.

$$V_D = [p(A), v^f(A), V(M_2), \dots, V(M_{2n}), p(B), v^f(B)]^T \gg \text{A ve B ortamının sıvı malzeme olduğu durum} \quad (4.85)$$

$V_D$  matrisinde yer alan terimler malzeme tipine bağlı, transfer matrisin ilişkili olduğu akustik alan vektörleridir.

$$D_{mn} = I_{mn} , D'_{mn} = J_{mn} \cdot T_i \quad (4.86)$$

$i$  : katman sayısını,  $m,n$  :katmanlar arası geçişi belirtir.

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{12} & D'_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & D_{23} & D'_{23} & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & D_{(m-1)(n-1)} & D'_{(m-1)(n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & D_{(m)(n)} & J_{(m)(n)} \end{bmatrix} \quad (4.87)$$

Katmanlı yapının sonlandığı bölgede ise sesin transfer edileceği ortamın özelliklerine bağlı olarak  $D$  matrisinin alt satırına ekleme yapılacaktır [3].

Katmanlı yapının sonlandığı, sesin iletildiği sıvı tabakanın karakteristik empedans değeriyle B bölgesindeki empedans  $\frac{Z_B}{\cos\theta}$  'dan bulunmaktadır [3]. Bahsedilen durum Şekil 4.13'te belirtilmiştir.

$$[D_1] = \begin{bmatrix} & & [D] \\ 0 & \dots & 0 & -1 & \frac{Z_B}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (4.88)$$

Eğer katmanlı yapı sert bir katı ortam ile sonlanırsa  $D_1$  matrisi değişecektir ve Eşitlik 4.89'da belirtilmiştir [4].

$$[D_1] = \begin{bmatrix} & & [D] \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

#### 4.7 Akustik Değişkenlerin Hesaplanması

Şekil 4.13'te yer alan ortamda yüzey empedansı  $Z_s = \frac{p(A)}{v_3^f(A)}$  'dan bulunmaktadır. Bu formülasyonun matris formatında gösterimi Eşitlik 4.90'da belirtilmiştir. Bilindiği üzere A ortamı hava kabul edildiğinden, sıvı ortam için akustik alan değişkenleri basınç ve yüzeyin normali doğrultusunda  $x_3$  yönünde ilerleyen boyuna dalganın hızı ile ifade edilmektedir [3].

$$[-1 \quad Z_s] \begin{bmatrix} p(A) \\ v_3^f(A) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

Bu gösterim dışında  $[D_1]$  matrisinin ilk satırına yüzey empedans ifadesi eklenerek yeni bir matris formu oluşturulur. Eşitlik 4.91'deki matrisin determinanı 0'a eşitlenerek  $Z_s$  değeri Eşitlik 4.92'den bulunmaktadır [9].

$$\begin{bmatrix} -1 & Z_s & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & [D_1] & & \end{bmatrix} V_D = 0 \quad (4.91)$$

$$Z_s = -\frac{\det[D_1^1]}{\det[D_1^2]} \quad (4.92)$$

Eşitlik 4.92'de belirtilen  $[D_1^1]$ ,  $[D_1]$  matrisinin ilk sütununun kaldırılması sonrası elde edilen kare matristir.  $[D_1^2]$  ise  $[D_1]$  matrisinin ikinci sütununun kaldırılması ile elde edilen kare matristir.  $Z_s$ ' in elde edilebilmesi için belirtilen kare matrislerin determinanı alınarak yüzey empedansı elde edilmektedir [3, 9].

Katmanlardan oluşan malzeme yüzeyinin yansımaya katsayısının bulunabilmesi için yüzey ve malzemenin bulunduğu hava ortamlarından kaynaklanan empedans değerlerinden faydalanılmaktadır. Yansımaya katsayısının formülü aşağıda belirtilmiştir [3].

$$\text{Yansımaya Katsayısı} = \frac{Z_s - \frac{Z_0}{\cos(\theta)}}{Z_s + \frac{Z_0}{\cos(\theta)}} \quad (4.93)$$

İletim katsayısının bulunmasına yönelik olarak Şekil 4.13'teki ortam referans alındığında, A yüzeyindeki ses dalgasının sahip olduğu basınç ile iletilen ses dalgasının sahip olduğu basınç arasındaki ilişki Eşitlik 4.94'te belirtilmiştir. Belirtilen orantının  $[D_1]$  matrisinin ilk satırına  $V_D$  ile uyumlu olacak şekilde eklenmesiyle Eşitlik 4.95'te belirtilen kare matris yapısı oluşmaktadır. Oluşturulan kare matrisin determinantı 0'a eşit olacağından, iletim katsayısı Eşitlik 4.95'te belirtilen determinant hesaplaması ile bulunur.

$$\frac{P(A)}{1 + \text{yansımaya katsayısı}(1+R)} = \frac{P(B)}{\text{iletim katsayısı}(T)} \quad (4.94)$$

$$\begin{bmatrix} T & 0 & \dots & -(1+R) & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} V_D = 0, \quad \text{İletim Katsayısı} = (1+R) \frac{\det[D_1^{N-1}]}{\det[D_1^1]} \quad (4.95)$$

İletim katsayısı hesaplamasında yer alan N değişkeninin anlamı, malzemenin sahip olduğu akustik değişkenlerin yer aldığı  $V_D$  matrisinin boyutuna eşittir. Formülasyona göre N-1. sütun  $[D_1]$  matrisinden çıkarılır ve determinant alınır. Yüzey empedansında ifade edilen  $\det[D_1^1]$  ifadesi tekrar kullanılarak iletim katsayısı elde edilir [3, 4].

Sönümleme katsayısını bulmak için yansımaya katsayısından faydalanılmaktadır. Yansımaya katsayısı bulunurken yüzeyin sahip olduğu empedans değeri kullanılmaktadır. Yüzeyin sahip olduğu sönümleme katsayısı  $\alpha$  ile belirtilmektedir [7].

$$\text{Sönümleme katsayısı} (\alpha) = 1 - |R|^2 \quad (4.96)$$

Ses sönümleme özelliği, havada var olan sesi malzemenin sönümleme yeteneğidir. Bilindiği gibi ses dalgası malzeme yüzeyine çarptığında bir kısmı iletilir, bir kısmı sönümlenir, bir kısmı da çarptığı yüzeyden yansır. Ses dalgasının malzeme içerisinde ilerleyen kısmı malzemenin gözeneklerine girerek hava molekülleri ile gözeneklerin duvarı arasındaki sürtünme ve viskozite direncinin etkisiyle ses enerjisinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşür ve bu şekilde sönümlenir. Malzemenin ses sönümleme durumu, sönümleme katsayısı ile

ölçülmektedir. Sönümlenme katsayısının belirli frekans aralığındaki ortalaması gürültü azaltma katsayısına karşılık gelmektedir. Gürültü azaltma katsayısı, gürültü kontrolü için ses sönümleyici malzemelerin etkinliğini belirlemede kullanılan değişkendir. Gürültü azaltma katsayısı 0 ise yüzey tamamen yansıtıcı özelliğe sahip, 1 ise yüzey tamamen sönümleyici özelliğe sahiptir. Genellikle sönümlenme özelliğinin incelendiği frekans değerleri 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ve 4000 Hz'dir. Herhangi bir malzeme sesi sönümler ancak fark, sönümlenme kapasitelerinin büyük ölçüde farklı olmasıdır. Yukarıda belirtilen altı frekansın ortalama ses yutma katsayısı 0,2' den büyükse, malzemeye ses sönümleyici malzeme denir [19 – 20]. Tez çalışmasında gürültü azaltma katsayısından ziyade sönümlenme katsayılarının düşük frekans aralığındaki dağılımı tespit edilmektedir.

Ses sönümlenme kalitesi, kullanılan malzemenin yoğunluğuna (eğer yoğunluk fazla olursa düşük frekanslı ses sönümlenme etkisi gelişirken, yüksek frekanslı ses sönümlenme etkisi azalır.), kullanılan malzemenin kalınlığına (gözenekli malzemenin kalınlığının artırılması düşük frekanslı sesin sönümlenme özelliğini artırırken, yüksek frekanslı sesler üzerinde az etkin olmaktadır), katmanlı yapıda havanın yer almasına (hava tabakasının varlığı, bir malzemenin etkin kalınlığını artırır, özellikle düşük frekanslı sesler üzerinde sönümlenme durumunu iyileştirir.), son olarak malzeme gözeneklerinin (küçük boyutlu ve fazla sayıdaki açık gözeneklere sahip olan malzemeler daha iyi ses sönümlenme özelliğine sahiptirler. Gözenekli bir ses emici malzemenin yapısal özellikleri, malzemeye belirli bir hava geçirgenliği sağlayan yüzeyden iç kısma kadar malzemenin her yerinde çok sayıda birbirine bağlı gözenek ve sürekli kabarcıklardır.) yapısına bağlıdır [19].

## 5. LİTERATÜRDE YER ALAN AKUSTİK YÜZEY TASARIMLARI

Bu bölümde, ses dalgalarının farklı yüzeylere çarpması sonucunda yüzeyin özelliklerine bağlı olarak farklı frekans aralıklarındaki davranışları incelenmektedir. Literatürden alınan örnek çalışmaların teyit edilmesine bağlı olarak oluşturulan algoritmanın doğruluğu sağlanmış olacaktır.

Yapılacak örnek çalışmalara sade olması açısından tek katmanlı yapılar ile başlanacak olup, sonrasında farklı malzeme tipleriyle çok katmanlı yapılar için doğrulama çalışmaları gerçekleştirilecektir.

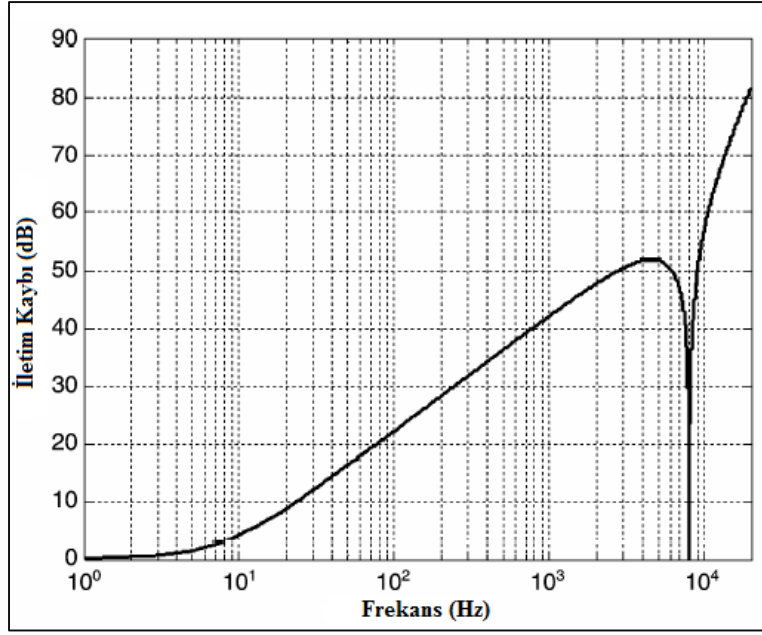
### 5.1 Katı Malzemedan Oluşan Tek Katmanlı Yüzey

Bu bölümde literatürde yer alan çelik malzemesi doğrulanacaktır [6]. Kullanılan malzemenin farklı katman kalınlıklarında oluşturduğu iletim kaybı incelenecektir. Ses dalgasının yüzeye çarpma açısı  $45^\circ$  olarak belirtilmiştir. Tek katmanlı yapı hava ortamına açılacaktır, bir başka deyişle malzeme bitiminde hava yer almaktadır.

Tablo 5.1. Çelik malzemesinin özellikleri

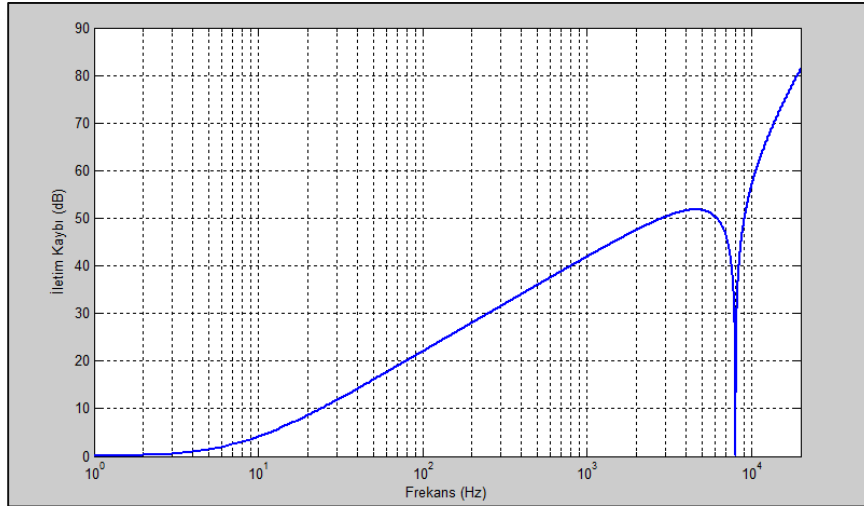
Malzeme Özellikleri	
Malzeme Kalınlığı (mm)	3
Malzeme Yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
Poisson Oranı	0.3
Young Modülü (GPa)	210

Tablo 5.1' de verilen malzeme özellikleri ile TMM kullanılarak çelik malzeme ortamının iletim kaybı elde edilmiştir.



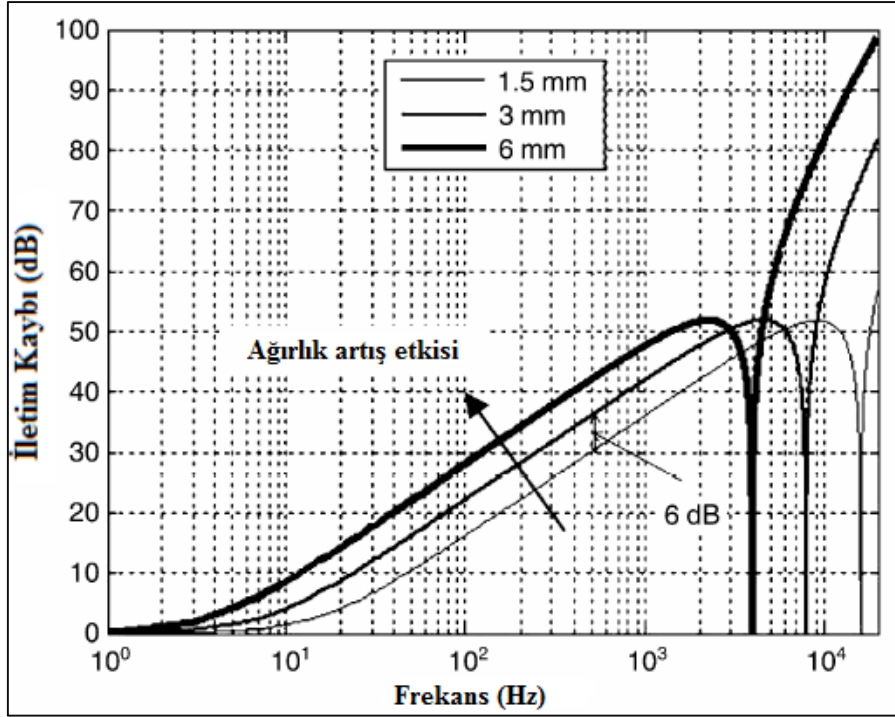
Şekil 5.1. Literatürde yer alan çelik ortamın iletim kaybı [6].

MATLAB programı kullanılarak oluşturulan algoritmaya malzeme özelliklerinin girdi olarak eklenmesi sonrasında elde edilen grafik Şekil 5.2'de belirtilmiştir. Tablo 5.1'de belirtildiği gibi malzeme kalınlığı 3 mm olarak alınmıştır. Şekil 5.1 ile Şekil 5.2 arasında karşılaştırma gerçekleştirildiğinde, elde edilen sonuçların aynı olduğu gözlenmiştir.

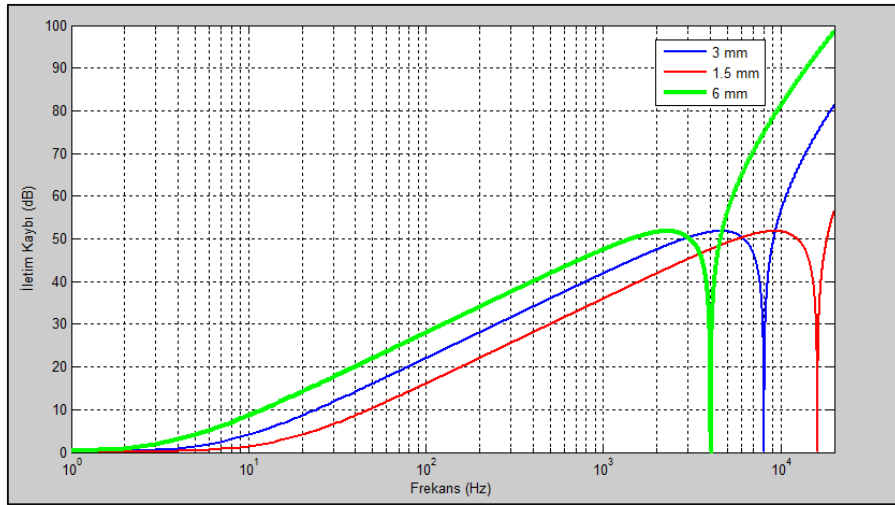


Şekil 5.2. 3 mm kalınlığındaki çelik malzemenin iletim kaybı.

Aynı malzemenin farklı kalınlıkları için Şekil 5.3'te belirtilen grafik, Şekil 5.4 ile doğrulanmıştır.



Şekil 5.3. Literatürde belirtilen farklı kalınlıktaki katı malzemenin iletim kaybı [6].



Şekil 5.4. Farklı katman kalınlığındaki katı malzemenin iletim kaybı.

Yukarıda belirtilen grafikler hakkında yorum yapmak gerekirse malzemenin kalınlığı arttıkça yalıtım davranışının minimum olduğu frekans değeri düşme eğilimindedir. Malzemenin kalınlığı ile kritik frekans değeri arasında ters orantı vardır. Ayrıca Şekil 5.4'te belirtildiği gibi malzemenin kalınlığı arttıkça sağladığı iletim kaybı artış göstermiştir. Ses iletimi, sesin çarptığı malzeme ortamında kütle ve ses frekansı gibi değişkenlere bağlı olarak malzemenin titreşimi ile sağlanmaktadır. Ortamın kütlesi artarken, malzemenin sahip olduğu atalet kuvveti sonucunda yalıtım artmaktadır [21].

Tablo 5.2. Katı malzemenin kalınlığına bağılı, iletim kaybının minimum olduğu frekans değerleri

<b>Kalınlık (mm)</b>	<b>İletim Kaybının Minimum Olduğu Frekans (Hz)</b>
1.5	16130
3	8066
6	4033

### 5.2 Katı ve Sıvı Malzemelerden Oluşan Üç Katmanlı Yüzey

Katmanlı yapıda ses dalgasının yüzeye çarptığı katı malzeme ortamı için alçıpan seçilmiştir. İkinci katman olarak hava ortamı eklenmiş olup sonrasında tekrar alçıpan malzemesi eklenerek üç katmanlı yapı oluşturulmuştur [4]. Farklı malzeme tiplerinin kullanıldığı durumlarda arayüz matrislerinden yararlanarak transfer matrislerin elde edilmesi sağlanacaktır. Yapılan örnekte son katmanda bulunan alçıpan sonrası hava ortamı yer almaktadır. Katı malzemeler arasında yer alan hava ortamı daha önce belirtildiği gibi sıvı malzeme olarak ele alınmaktadır.

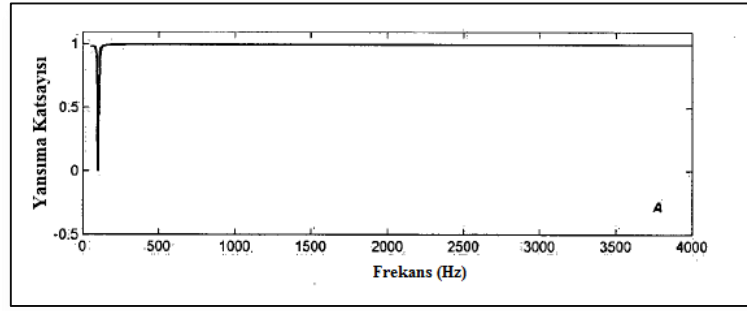
Tablo 5.3. Katı ve sıvı malzemelerin özellikleri

<b>Malzeme Özellikleri</b>	<b>Katı Malzeme</b>	<b>Sıvı Malzeme</b>
Malzeme Kalınlığı (mm)	12	100
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1200	1.2
Poisson Oranı	0.25	-
Young Modülü (GPa)	7	-

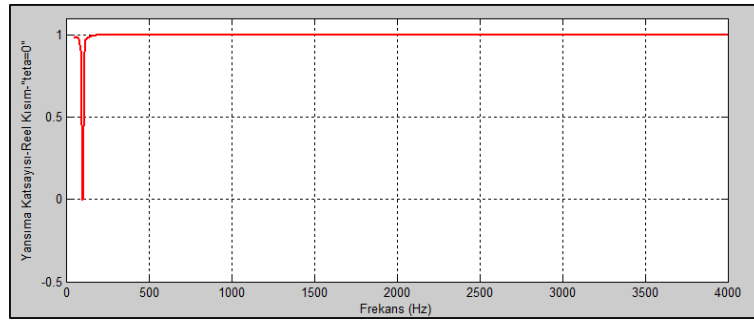
Sesin yüzeye 0°, 45° ve 75° ile çarpma durumlarındaki yansıma katsayıları ve yüzey empedans grafikleri incelenecektir [4]. Yüzey empedans grafiklerinde belirtilen empedans değerleri, havanın karakteristik empedans değeriyle normalize edilmiş olacaktır.



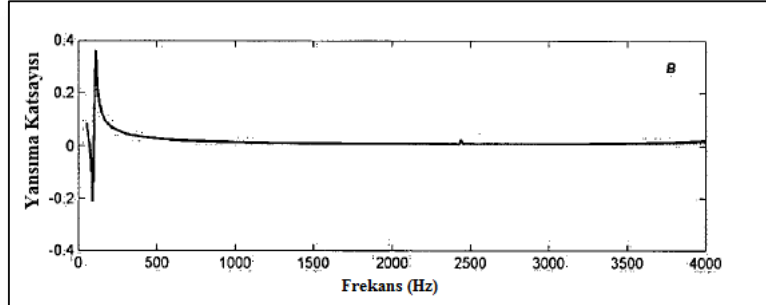
**Sesin yüzeye gelme açısı = 0°**



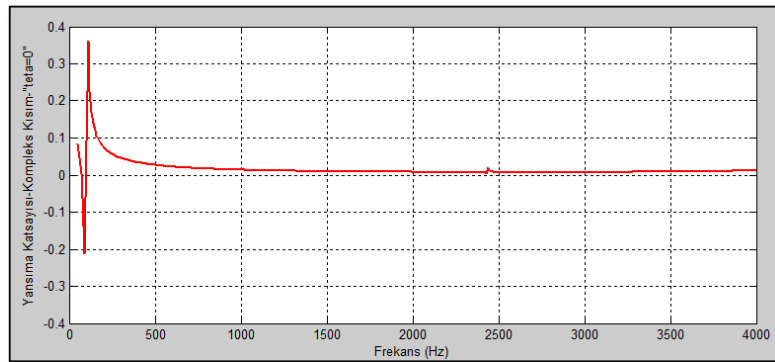
Şekil 5.5. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansımaya katsayısı-reel kısım [4].



Şekil 5.6. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansımaya katsayısı-reel kısım.

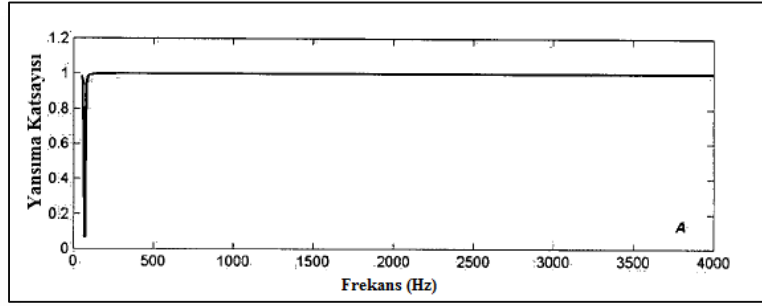


Şekil 5.7. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansımaya katsayısı-sanal kısım [4].

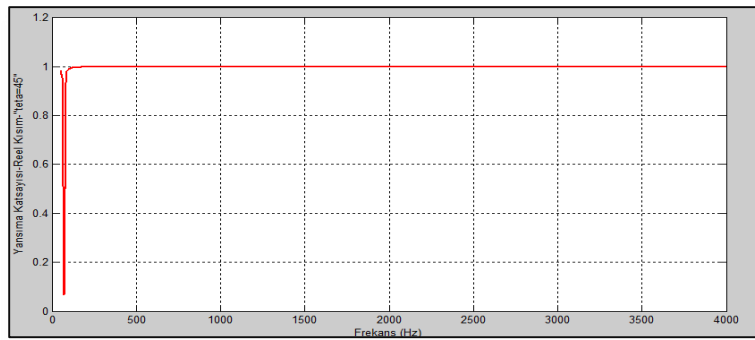


Şekil 5.8. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansımaya katsayısı-sanal kısım.

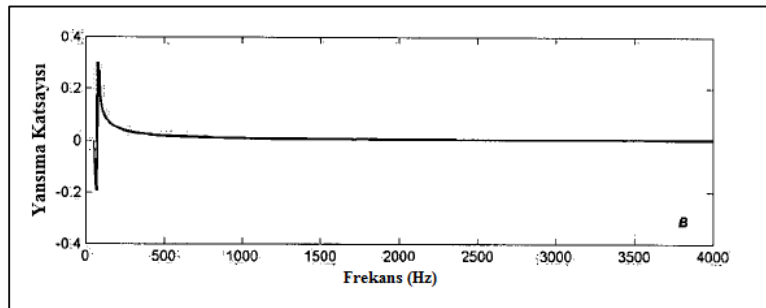
**Sesin yüzeye gelme açısı = 45°**



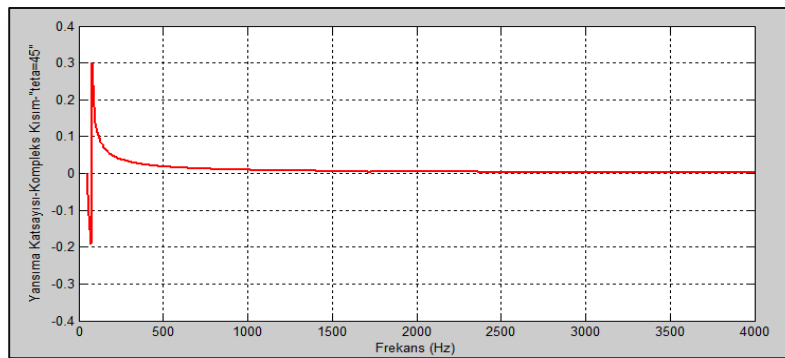
Şekil 5.9. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-reel kısım [4].



Şekil 5.10. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-reel kısım.

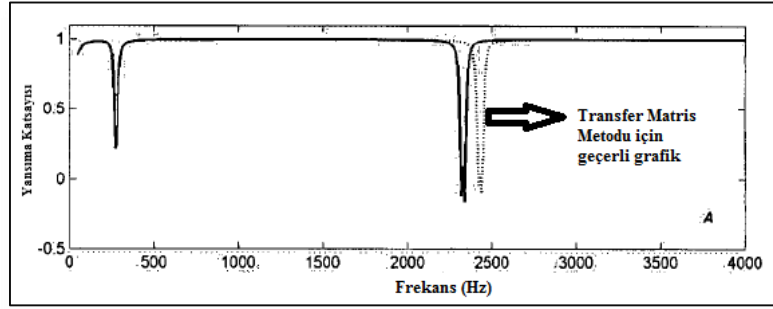


Şekil 5.11. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansıma katsayısı-sanal kısım [4].

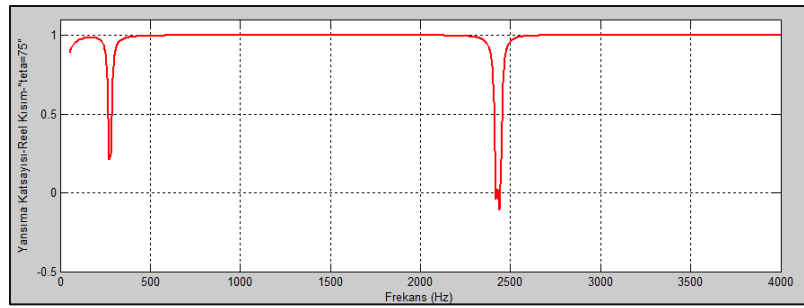


Şekil 5.12. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansıma katsayısı-sanal kısım.

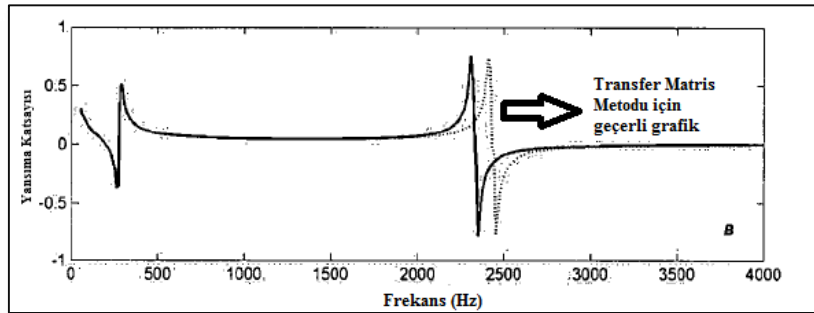
**Sesin yüzeye gelme açısı = 75°**



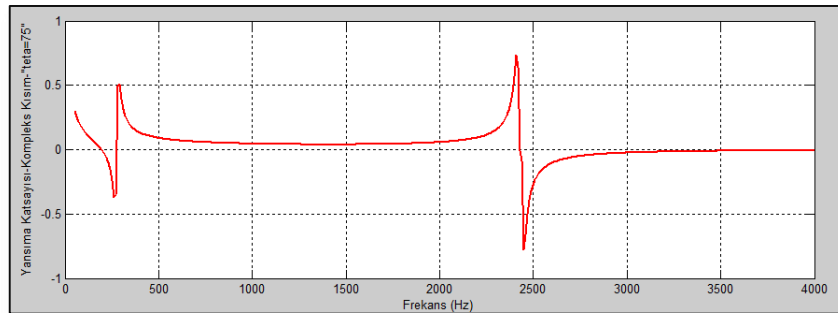
Şekil 5.13. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansımaya katsayısı-reel kısım [4].



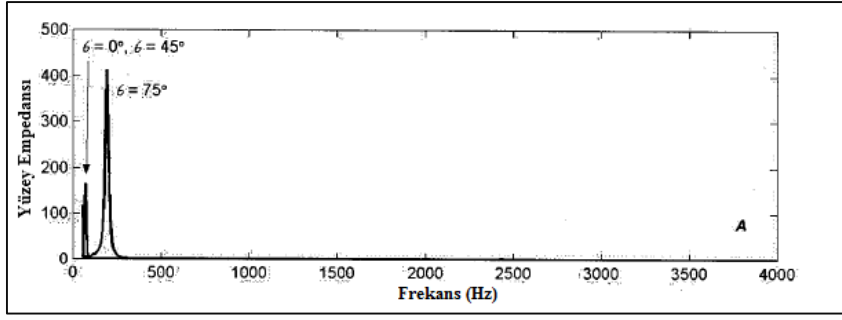
Şekil 5.14. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansımaya katsayısı-reel kısım.



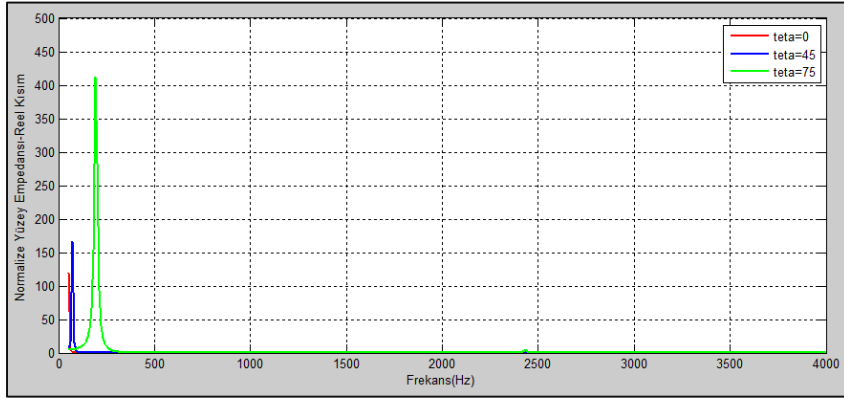
Şekil 5.15. Literatürde yer alan üç katmanlı yapının yansımaya katsayısı-sanal kısım [4].



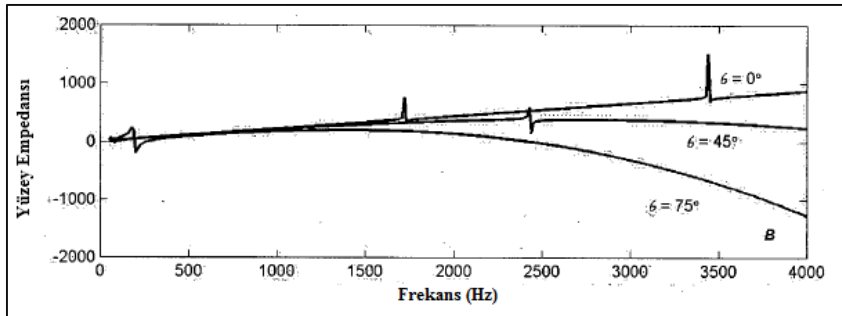
Şekil 5.16. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yansımaya katsayısı-sanal kısım.



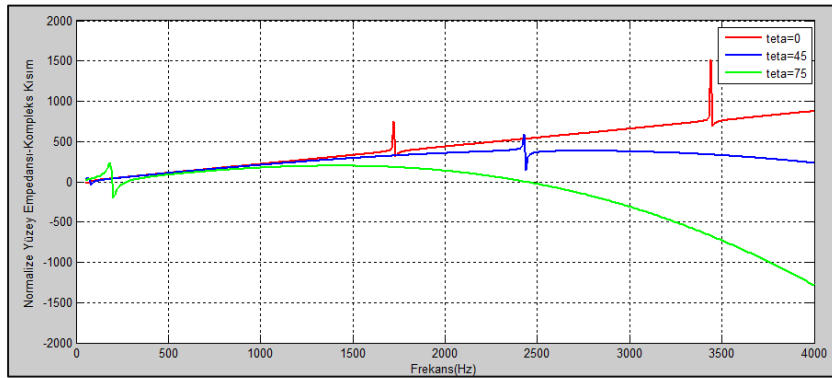
Şekil 5.17. Literatürde yer alan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-reel kısım [4].



Şekil 5.18. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-reel kısım.



Şekil 5.19. Literatürde yer alan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-sanal kısım [4].



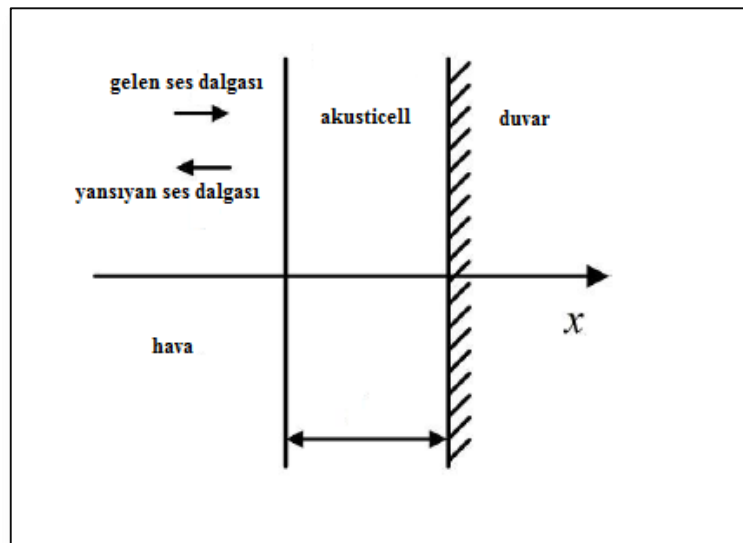
Şekil 5.20. Oluşturulan üç katmanlı ortamın yüzey empedansı-sanal kısım.

Yansıma katsayısının reel bileşeni 1 değerine, sanal bileşeni ise 0 değerine yakın ise sesin çarptığı yüzey serttir ve çarpan sesin büyük bir kısmı yansıtacaktır. Yansıma katsayısının düşük olduğu frekans değerlerinde ses, yüzey içerisine nüfuz edecektir. Yansıma katsayılarının sanal bileşenlerinde yer alan ani iniş-çıkışların gözlemlendiği tepe noktalarının oluşma sebebi, sesin malzeme içerisinde ilerlerken faz değişimine maruz kaldığını göstermektedir. Anlık iniş-çıkış esnasında sanal bileşenin negatif eksenden pozitif eksene çıktığı frekans değeri rezonans frekans değerine eşit kabul edilmektedir. Bu durum sesin yüzeye çarptığı açı değerlerine bağlı olarak değişmektedir [4].

### 5.3 Gözenekli Malzemeden Oluşan Tek Katmanlı Yüzey

Gözenekli malzemeler hem katı hem de sıvı malzeme özelliği içermektedir. Bu çalışmada, tek katmanlı akusticell malzemesinin sönümlenme katsayısı ve yüzey empedansı incelenecektir [8]. Gözenekli malzemeler kullanılarak yüzey tasarlandığında sesin yüzeye çarpma açısı  $0^\circ$  olarak alınacaktır. Bunun sebebi, kullanılan malzeme anizotropik olabileceğinden normal yönde ilerleyen boyuna dalgalar, eşdeğer izotropik malzemede de aynı şekilde ilerlediğinden dolayı ses dalgasının yüzeye dik olarak çarpacağı durum dikkate alınacaktır. Belirtilen katmanın sonlandığı bölgede duvar, akusticell malzemesine yapışık bir şekilde yer alacaktır. Akusticell malzemesinin sonrasında duvar arayüzüne ulaşan partiküller sert yüzeye çarptıklarında hızlarını kaybedecekler ve hızları o bölgede 0'a eşit olacaktır [3].

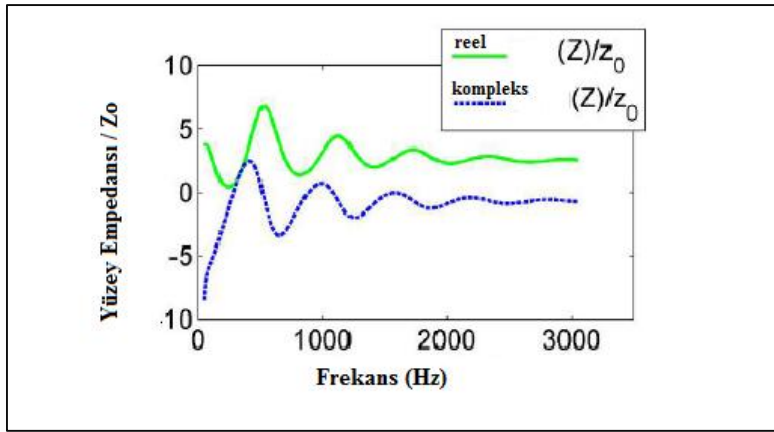
Yapılan çalışmada yüzey empedansı havanın empedans değeriyle normalize edilecektir.



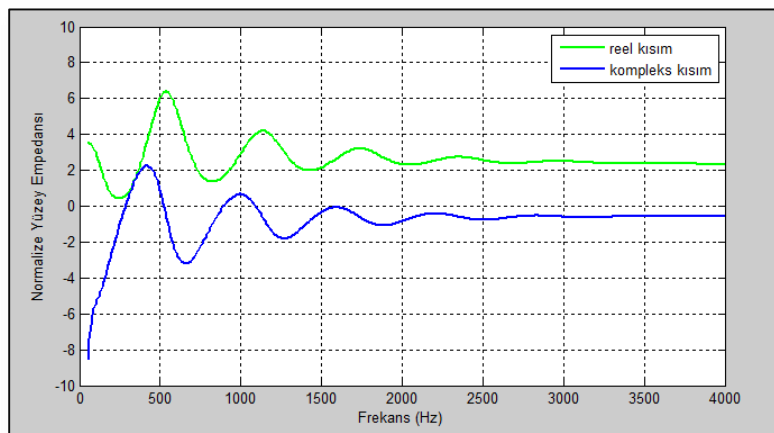
Şekil 5.21. Duvar ile sonlandırılmış ortam gösterimi [8].

Tablo 5.4. Gözenekli malzeme özellikleri

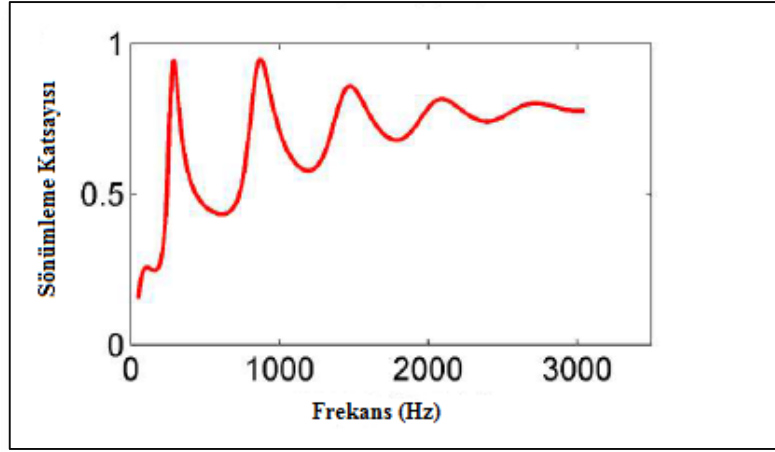
Malzeme Özellikleri	
Malzeme Kalınlığı (m)	0.1
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	26
Gözeneklilik	0.96
Kıvrımlılık	1.38
Akış Direnci (Ns/m <sup>4</sup> )	22000
Poisson Oranı	0.23
Kayma Modülü (N/m <sup>2</sup> )	78050 (1+j0.13)
Viskozite Boyutu (m)	17× 10 <sup>-6</sup>
Termal Boyutu (m)	40× 10 <sup>-6</sup>



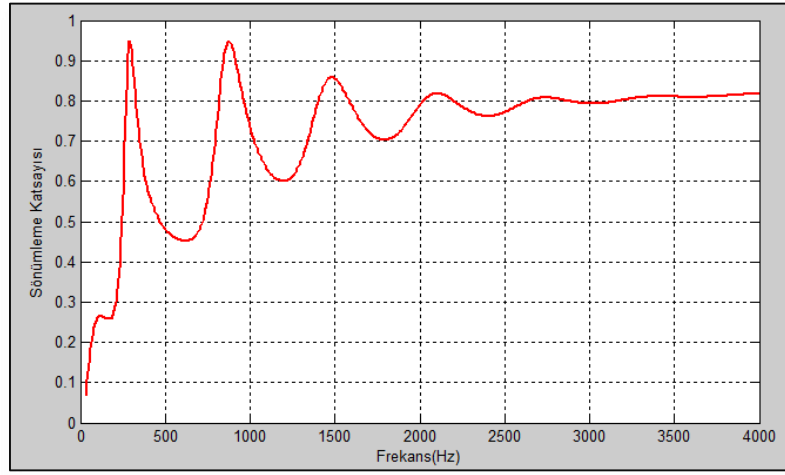
Şekil 5.22. Literatürde yer alan akusticell malzemesinin yüzey empedansı [8].



Şekil 5.23. Tablo 5.4'te yer alan gözenekli malzemenin kullanılması ile elde edilen yüzey empedansı



Şekil 5.24. Literatürde yer alan akusticell malzemesinin sönümlenme katsayısı [8].

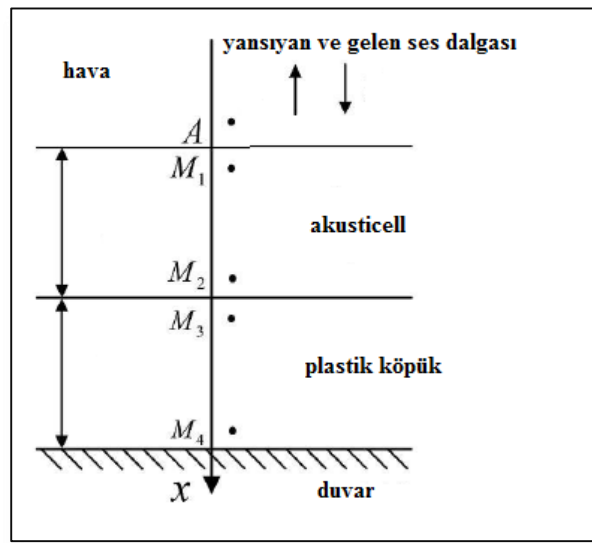


Şekil 5.25. Tablo 5.4'te yer alan malzemenin kullanılması ile elde edilen yüzeyin sönümlenme katsayısı.

Sönümlenme katsayısının yüksek olması yüzeyin sönümlenme özelliğinin fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum yüzey içerisinde ilerleyen dalganın maruz kalacağı sönümleyici etkinin de fazla olacağı anlamına gelmektedir. Sönümlenme katsayısının yer aldığı grafikteki ilk iki tepe noktasının gözlemlendiği frekans değerleri yüzeyin sahip olduğu rezonans frekanslarına karşılık gelmektedir [8]. Empedansın sanal bileşeninden de görülmektedir ki negatif eksenden pozitif eksene geçiş frekans değerleri, sönümlenme katsayısının ilk iki tepesinin gözlemlendiği frekans değerlerine yani rezonans frekanslarına karşılık gelmektedir. Belirtilen frekans değerlerinde yüzey empedansı minimum seviyelerine inmiştir.

#### 5.4 Gözenekli Malzemelerden Oluşan İki Katmanlı Yüzey

Yapılacak bu örnekte, tek katmanlı gözenekli malzemeden farklı olarak başka bir gözenekli malzeme ikinci katmana eklenecektir. Oluşturulan yüzeyin sönümlenme katsayısı ve tepe noktaların gözlemlendiği frekans değerlerinin değişimi incelenecektir. Kullanılacak malzemeler akusticell ve plastik köpüktür. İlk olarak malzemelerin tek tek davranışları incelenecektir, sonrasında iki malzemenin üst üste koyulması ile iki katmanlı yapı oluşturulacaktır. Tablo 5.5'te belirtilen plastik köpük iç katmanda, akusticell malzemesi ise dış katmanda yer almaktadır [8].

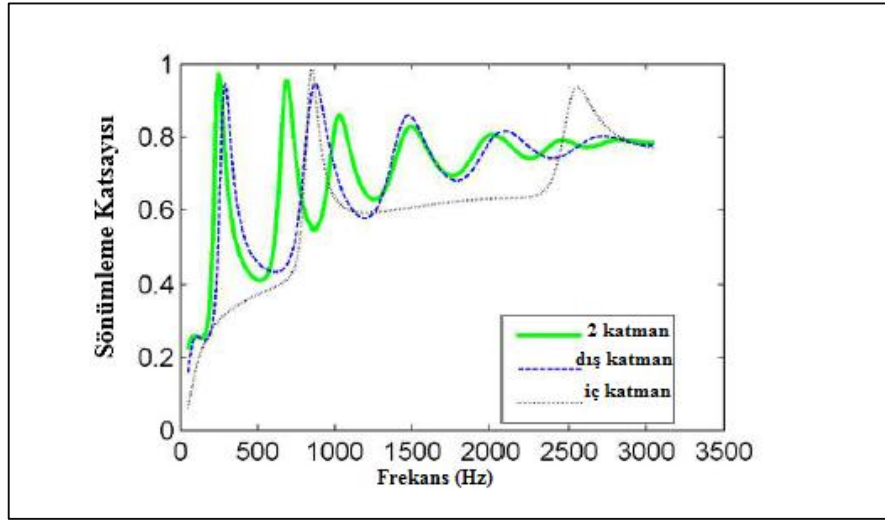


Şekil 5.26. İki katmanlı yapının gösterimi [8].

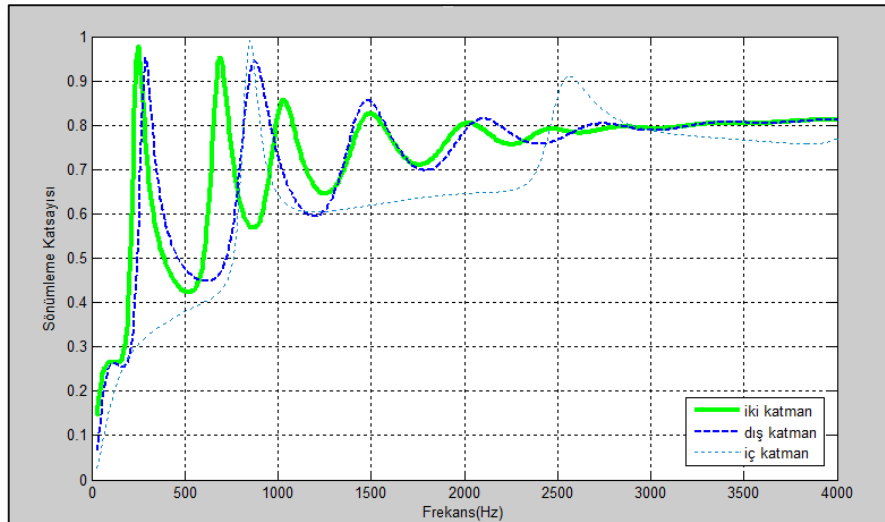
Tablo 5.5. Gözenekli malzemelerin özellikleri

Malzeme Özellikleri	Akusticell	Plastik Köpük
Malzeme Kalınlığı (m)	0.1	0.05
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	26	43
Gözeneklilik	0.96	0.925
Kıvrımlılık	1.38	1.2
Akış Direnci (Ns/m <sup>4</sup> )	22000	70000
Poisson Oranı	0.23	0.45
Kayma Modülü (N/m <sup>2</sup> )	78050 (1+j0.13)	102000+j6000
Viskozite Boyutu (m)	17× 10 <sup>-6</sup>	30× 10 <sup>-6</sup>
Termal Boyutu (m)	40× 10 <sup>-6</sup>	80× 10 <sup>-6</sup>





Şekil 5.27. Literatürde yer alan, plastik köpük ve akusticell malzemesinden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı [8].



Şekil 5.28. Akusticell, plastik köpük malzemeleri ve her ikisinin kullanıldığı yapının sönümlenme katsayısı.

Şekil 5.27'de belirtilen grafik, Şekil 5.28 ile doğrulanmıştır. Grafikler incelendiğinde, her bir malzemenin tek katmanlı yapısının ilk rezonans tepe noktaları birbirinden farklıdır. İç ve dış katman olacak şekilde bir araya getirilen malzemelerle iki katmanlı yapı oluşturulduğunda, akusticell malzemesinin ilk rezonans tepe noktası varlığını sürdürmüştür ancak, katmanların karakteristiklerine bağlı olarak çakıştıkları frekanslarda, çakışmanın olduğu frekansın daha düşük ve daha yüksek değerlerinde rezonans tepe noktaları oluşmaktadır. Sonuç olarak katmanlı yapıyı oluşturan gözenekli malzemelerin özelliklerine göre, genel yapının rezonans

tepe noktalarında değişim gözlenmiştir. Elde edilen grafikten de görüldüğü gibi, malzemelerin orjinal karakteristik grafikleriyle, bir araya gelerek oluşturdukları yapıdan elde edilen sönümlenme özelliğinde de farklılık tespit edilmiştir. Grafiklere göre çıkarılan bir diğer sonuç, malzemenin kalınlığı arttıkça ilk rezonans frekans değerinde düşüş olduğu gözlenmiştir [8].

## 6. ÇOK KATMANLI AKUSTİK YÜZEY TASARIMI

Literatürde yer alan çalışmaların doğrulanması sonrasında farklı malzeme tipleri ve dizi yapıları kullanılarak oluşturulan çok katmanlı yapılar bu bölümde belirtilecektir. Yüzeylerin sahip olduğu yansıma ve sönümlenme katsayıları değerlendirilecektir.

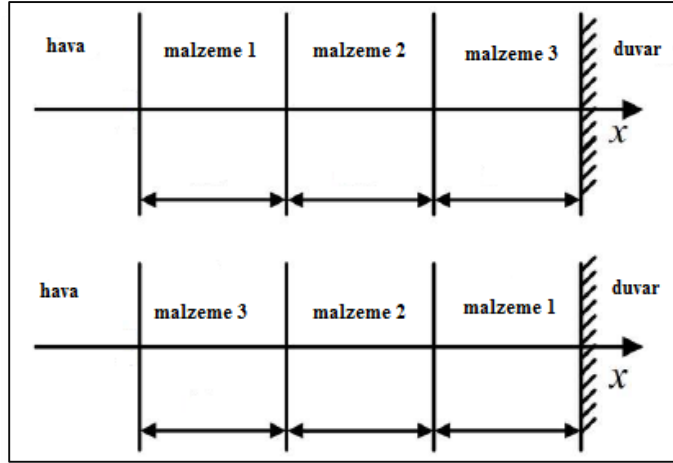
### 6.1 Gözenekli Malzemelerden Oluşan Üç Katmanlı Yüzey

Uygulanacak örnekte üç farklı gözenekli malzeme kullanılacaktır [4, 7]. Malzemeler yüksek akış direncine sahiptir. Bu malzemelerin farklı şekilde sıralanmasıyla katmanlı yapılar oluşturulacaktır. Malzeme sıralamasının sönümlenme katsayısı üzerine etkisi incelenecektir.

Tablo 6.1. Gözenekli malzemelerin özellikleri

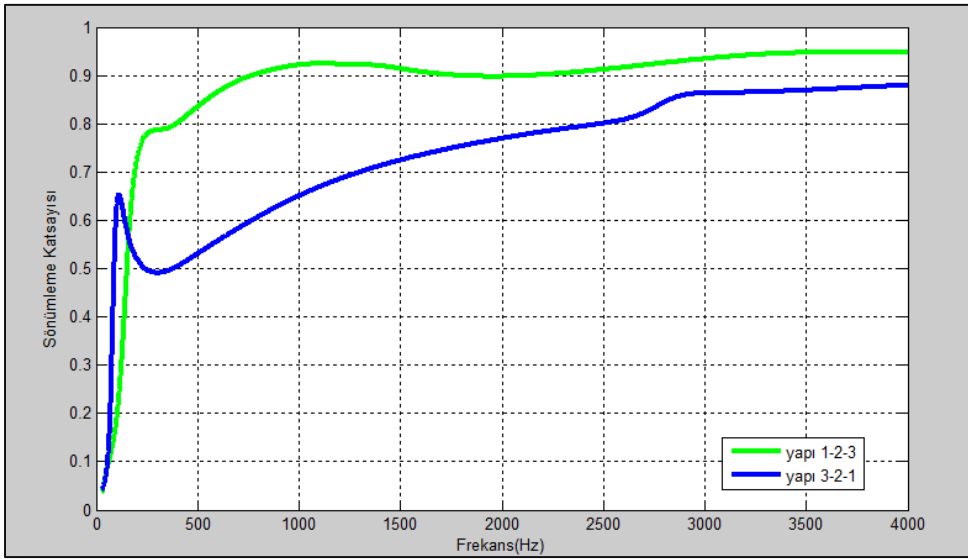
Malzeme Özellikleri	Plastik köpük (1)	Halı (2)	Cam yünü (3)
Malzeme Kalınlığı (m)	0.033	0.033	0.033
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	20	60	130
Gözeneklilik	0.98	1	0.94
Kıvrımlılık	1.5	0.99	1.06
Akış Direnci (Ns/m <sup>4</sup> )	10000	20000	40000
Poisson Oranı	0.35	0	0
Kayma Modülü (N/m <sup>2</sup> )	80000(1+j0.1)	1000(10+j5)	2200000(1+j0.1)
Viskozite Boyutu (m)	100× 10 <sup>-6</sup>	15× 10 <sup>-5</sup>	56× 10 <sup>-6</sup>
Termal Boyutu (m)	200× 10 <sup>-6</sup>	22 × 10 <sup>-5</sup>	112× 10 <sup>-6</sup>

Tablo 6.1'de görüldüğü gibi malzemelerin akış dirençleri incelendiğinde en küçük akış direnci plastik köpükte, orta akış direnci halı malzemesinde, maksimum akış direnci ise cam yününde bulunmaktadır.



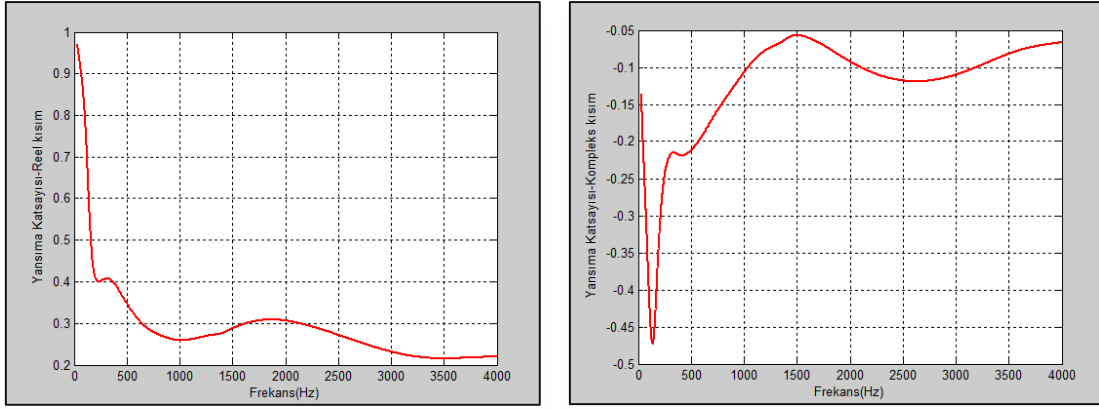
Şekil 6.1. Gözenekli malzemelerin dizilimi [7].

Şekil 6.1’de verilen ilk malzeme sıralamasında akış direnci küçükten büyüğe, diğer durumda da büyükten küçüğe sıralanmıştır.

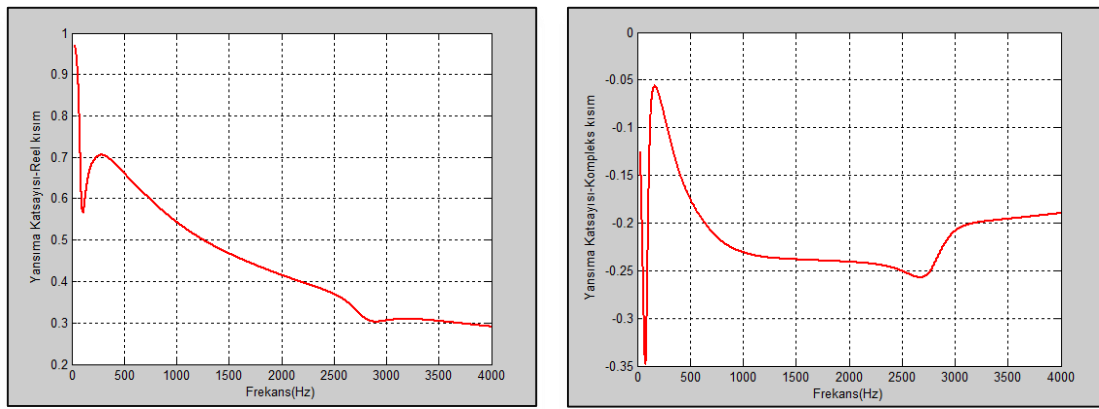


Şekil 6.2. Tablo 6.1’de belirtilen malzemelerin, farklı sıralanmasıyla elde edilen yüzeylerin sönümlenme katsayısı.

Diğer malzemelere göre küçük akış direncine sahip olan plastik köpüğün ilk katmanda yer alması yüzeyin sönümlenme özelliğini olumlu yönde etkilemiştir. Dolayısıyla yapı 1-2-3 sıralaması, yapı 3-2-1 sıralamasına göre daha iyi sonuç vermiştir. Katmanlı yapıyı oluşturan gözenekli malzemelerin akış direncine göre sıralanması yüzeyin sönümlenme katsayısını artıracığından malzemelerin bu doğrultuda dizilimi önemlidir.



Şekil 6.3. Yapı 1-2-3 için yansıma katsayısı-reel ve sanal kısım.



Şekil 6.4. Yapı 3-2-1 için yansıma katsayısı-reel ve sanal kısım.

Malzemelerin 1-2-3 şeklinde sıralanmasıyla, yansıma katsayısında hızlı bir düşüş gözlenmiş olup yüzeyin yansıma özelliği azalmıştır.

## 6.2 Baum-Sweet Dizisi Kullanılarak Oluşturulan Yüzey Tasarımları

Baum-Sweet, Eşitlik 6.1'de belirtilen kural çerçevesinde 0 ve 1'lerden oluşan sonsuz uzunluktaki bir dizi olarak tanımlanmaktadır.

$$m_n = \begin{cases} m_0, & m_n = 1, n' \text{ in binary gösteriminde art arda gelen } 0\text{'ların tek uzunlukta olmama durumu} \\ m_n = 0, & \text{diğer tüm durumlarda geçerli olmaktadır.} \end{cases} \quad (6.1)$$

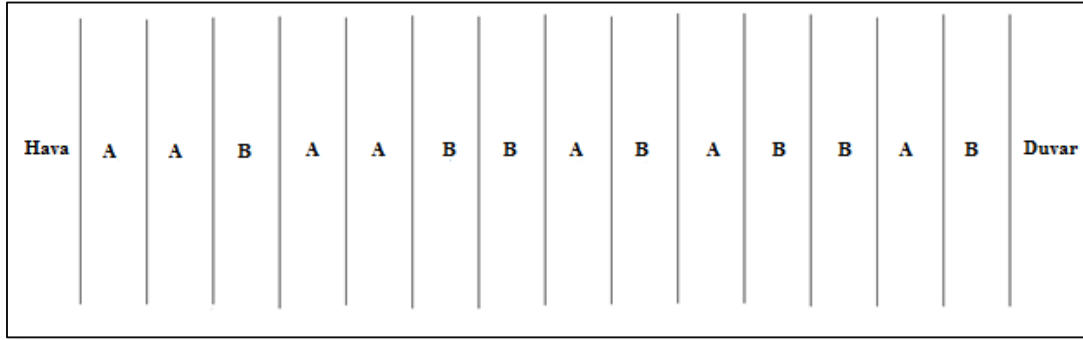
$n \geq 0$ , için geçerlidir [22].

$m_0 = 1$  ile başlanır. İlk terimden itibaren dizinin elemanları 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 ... olarak sıralanmaktadır [22].

Tasarlanacak katmanlı yüzeyin oluşturulmasında Baum-Sweet dizisinden faydalanılmaktadır. Farklı tip malzeme sıralamalarıyla yüzeyin sönümlenme ve yansımaya katsayılarındaki değişim incelenecektir.

### 6.2.1 Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

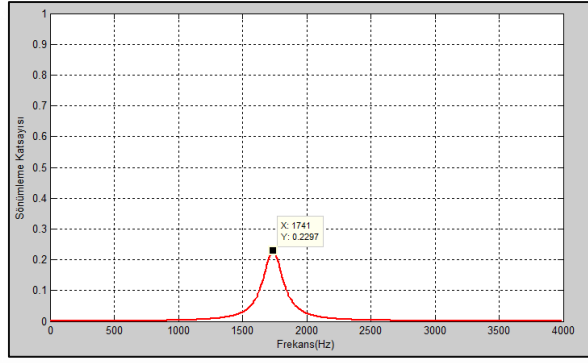
Bu kısımda oluşturulacak yüzey, hem katı hem de gözenekli malzeme içerecektir. Toplamda malzeme diziliminde 14 katman yer alacaktır. Katmanlı yapı, duvar ile sonlanacaktır. Sesin yüzeye dik çarptığı durum incelenecektir. Katmanlı yapıyı oluşturan malzemelerden A katı malzemeyi, B ise gözenekli malzemeyi belirtmektedir. Her bir katman kalınlığı 1 mm alınacağından, toplam malzeme kalınlığı 14 mm olacaktır.



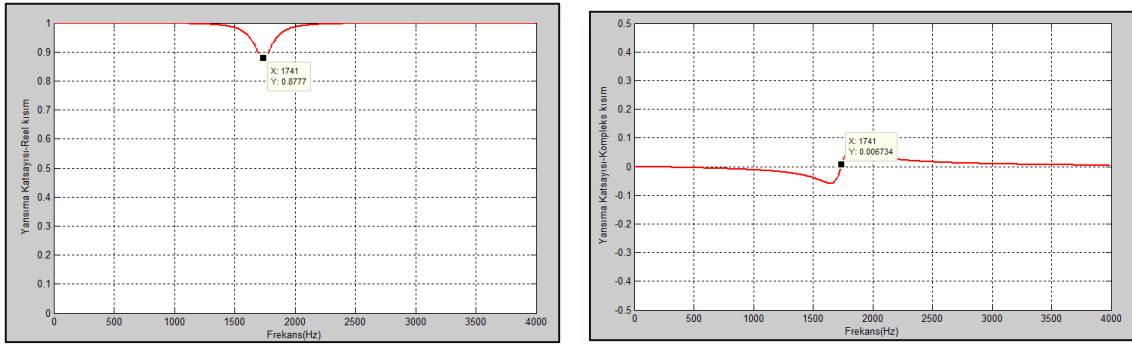
Şekil 6.5. Baum-Sweet dizisinden faydalanılarak oluşturulan malzeme dizilimi.

Tablo 6.2. Alçıpan ve cam yünü malzemelerinin özellikleri

Malzeme Özellikleri	Alçıpan	Cam yünü
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1200	130
Poisson Oranı	0.25	0
Young Modülü (GPa)	7	-
Gözeneklilik	-	0.94
Kıvrımlılık	-	1.06
Akış Direnci (Ns/m <sup>4</sup> )	-	40000
Kayma Modülü (N/m <sup>2</sup> )	-	2200000(1+j0.1)
Viskozite Boyutu (m)	-	56× 10 <sup>-6</sup>
Termal Boyutu (m)	-	112× 10 <sup>-6</sup>



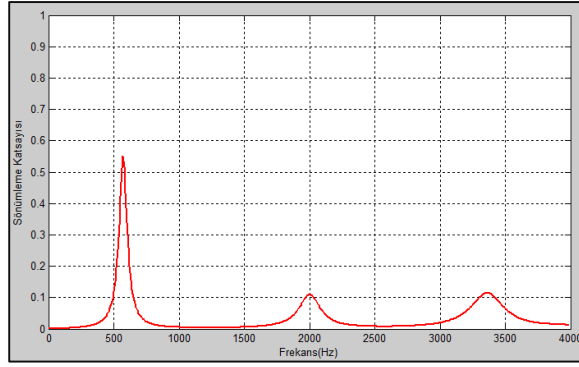
Şekil 6.6. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-cam yünü.



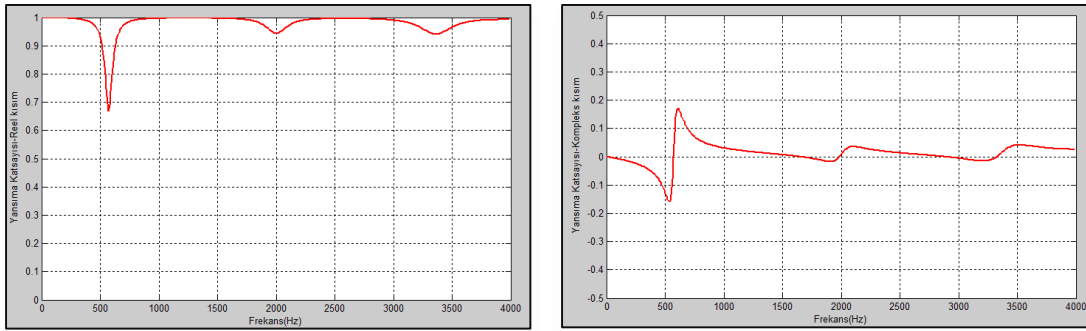
Şekil 6.7. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Oluşturulan yapıda katı malzemenin ilk katmanda yer alması, yüzeyin sönümlenme özelliğinin minimum değerlere inmesine sebep olmuştur. Yüzeyin yansıtıcı özelliği ise maksimum seviyelerde gözlenmiştir. İlgili durum Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de belirtilmiştir. Yansıtıcı özelliğin baskın olması yüzeyin sahip olduğu yüksek empedans değerinden kaynaklanmaktadır. 1741 Hz frekans değerinde sönümlenme katsayısında bir miktar artış gözlenirken yansıma katsayısının sanal bileşeninde anlık olacak şekilde negatif eksenden pozitif eksene faz geçişi gözlenmiştir. İlgili frekans değeri yüzey için rezonans frekansına karşılık gelmektedir.

Katı katmanlar arasında gözenekli malzeme olarak cam yünü kullanılmıştır ancak cam yününe göre daha düşük akış direncine sahip olan plastik köpük kullanıldığında elde edilen görüntüler Şekil 6.8 ve 6.9’da belirtilmektedir. Plastik köpük parametreleri Tablo 6.3’te yer almaktadır.



Şekil 6.8. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-plastik köpük.



Şekil 6.9. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Elde edilen grafikler sonucunda cam yüzüne göre plastik köpük malzeme kullanımı, sönümlenme katsayı grafiğinde az miktarda iyileşme sağlamıştır. Sönümlenme katsayısının maksimuma ulaştığı değerlerin gözlemlendiği frekanslar yüzeyin rezonans frekanslarına karşılık gelmektedir. Rezonans frekans değerleri yaklaşık olarak 571, 2001 ve 3361 Hz'dir. Bu frekans değerleri dışındaki frekans aralıklarında yüzeyin yansıtıcı özelliği baskındır.

## 6.2.2 Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

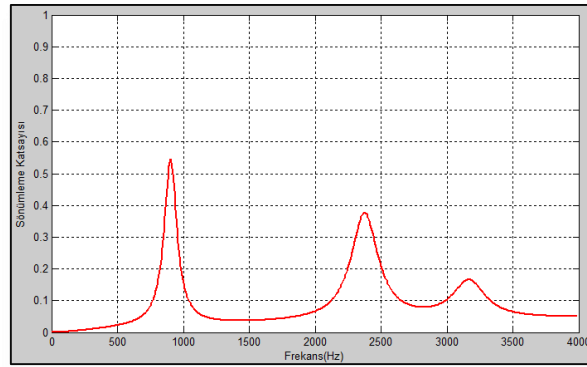
Bu örnekte hava ile temas eden ilk katman, gözenekli malzemedir. Şekil 6.5'te belirtilen katmanlı yapıda A malzemesi plastik köpük, B malzemesi ise alçıpan olacaktır. Malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşturulan katmanlı yapının davranışları Şekil 6.10 ve 6.11'de yer almaktadır.

Şekil 6.10'da belirtilen grafik incelendiğinde, yüzeyin sönümlenme katsayısının yaklaşık 901, 2371 ve 3171 Hz noktalarında maksimum değerlerine ulaştığı gözlenmektedir. Bu frekans değerleri dışındaki değerlerde de belirli bir seviyede yüzeyin sönümlenme davranışı mevcuttur.

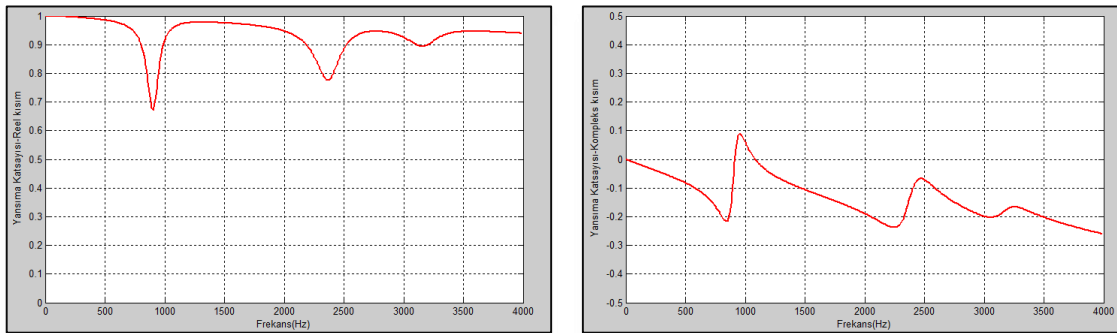


Tablo 6.3. Alçıpan ve plastik köpük malzemelerinin özellikleri

Malzeme Özellikleri	Alçıpan	Plastik köpük
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1200	20
Poisson Oranı	0.25	0.35
Young Modülü (GPa)	7	-
Gözeneklilik	-	0.98
Kıvrımlılık	-	1.5
Akış Direnci (Ns/m <sup>4</sup> )	-	10000
Kayma Modülü (N/m <sup>2</sup> )	-	80000(1+0.1j)
Viskozite Boyutu (m)	-	100 × 10 <sup>-6</sup>
Termal Boyutu (m)	-	200 × 10 <sup>-6</sup>



Şekil 6.10. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.



Şekil 6.11. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Yapının ilk iki katmanında gözenekli malzemenin yer alması sönümlenme katsayısı grafiğinde iyileşme sağlamıştır. Yansıma katsayısı, yüzeyin sönümlenme katsayısının belirgin olduğu frekans aralığı dışında genel olarak maksimum seviyelerde gözlenmiştir. 901 Hz frekans

değerinde yansıma katsayısının sanal bileşeninde faz geçişi görülmüştür. Bu doğrultuda, 901 Hz frekansının yüzeyin rezonans frekansına eşit olduğu söylenmektedir.

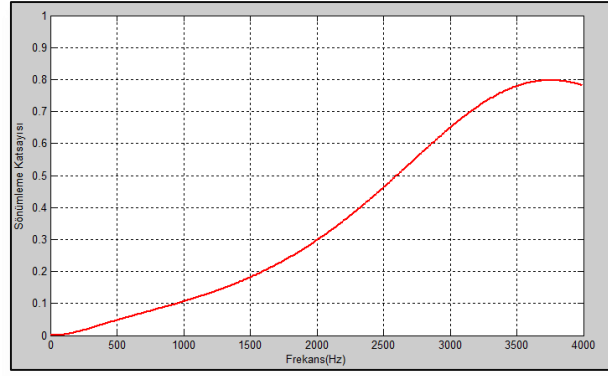
### 6.2.3 Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Bu yüzeyde sıvı malzeme olarak hava kullanılacak, sesin yüzeye dik çarptığı durum değerlendirilecektir. Şekil 6.5'te belirtilen katmanlı yapıdaki A malzemesi için plastik köpük, B malzemesi için ise hava kullanılacaktır.

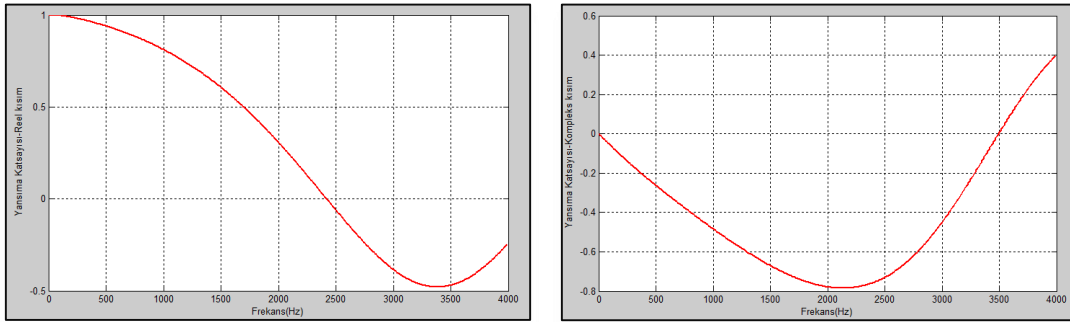
Tablo 6.4. Hava ve plastik köpük malzemelerinin özellikleri

Malzeme Özellikleri	Hava	Plastik köpük
Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	20
Poisson Oranı	-	0.35
Gözeneklilik	-	0.98
Kıvrımlılık	-	1.5
Akış Direnci	-	10000
Kayma Modülü	-	80000(1+0.1j)
Viskozite Boyutu	-	100 × 10 <sup>-6</sup>
Termal Boyutu	-	200 × 10 <sup>-6</sup>

Şekil 6.12'de yer alan grafik doğrultusunda, düşük frekanstaki seslere yönelik yüzey, maksimum seviyede sönümlenme özelliği göstermektedir. Aynı gözenekli malzeme ve özelliklere sahip katmanların arasına katı malzeme koyulduğunda, katmanlı yapının sönümleyici etkisi oldukça kısıtlı bir aralıkta ve seviyede yer almakta iken gözenekli katmanlar arasında havanın bulunması belirtilen frekans aralığında etkili bir seviyede sönümlenme özelliği sağlamaktadır. Malzemenin sönümlenme özelliği artış eğiliminde olduğundan yansıtma özelliğinde düşüş gözlenmiştir.



Şekil 6.12. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.



Şekil 6.13. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

### 6.3 Thue-Morse Dizisi Kullanılarak Oluşturulan Yüzey Tasarımları

Thue-Morse, 0 ve 1 sayılarından oluşan sonsuz bir dizidir. Dizi 0 ile başlamakta olup 0110100110010110.... şeklinde devam etmektedir. Dizin oluşmasında etkili olan 1'lerin sayısıdır. Örneğin, 11 sayısı ikili tabanda 1011 şeklinde yazılmaktadır. 11 sayısının ikili taban karşılığında 1'ler tek sayıda olduğundan Thue-Morse dizisinde 11 sayısı 1'e karşılık gelmektedir. 1'lerin sayısının çift olduğu veya hiç olmadığı durum ise dizide 0 olarak belirtilmektedir [23].

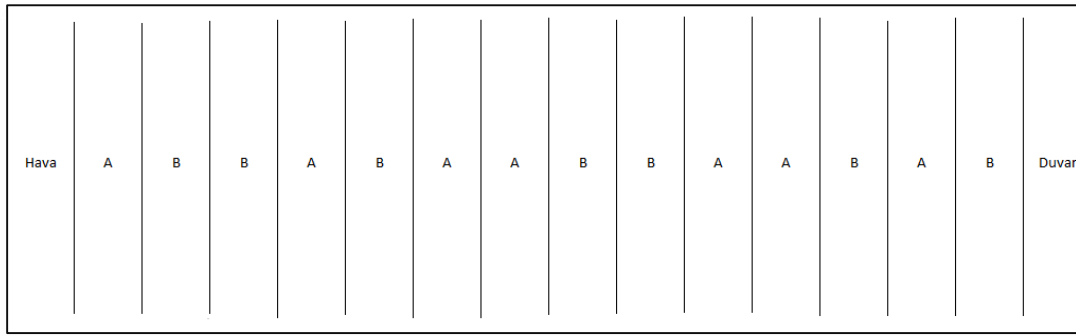
İkili Sayı Sistemi	Thue-Morse Dizisi
0000	0
0001	1
0010	1
0011	0
0100	1
0101	0
0110	0
0111	1
1000	1
1001	0
1010	0
1011	1
1100	0
1101	1
1110	1
1111	0

Şekil 6.14. Sayıların ifade edilirken sahip oldukları 1 sayısına göre Thue-Morse dizisi.

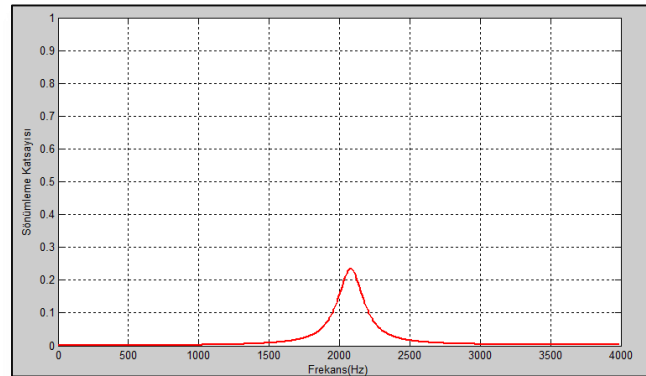
Thue-Morse dizisi, iki farklı malzeme tipinin kullanıldığı çok katmanlı yüzey tasarımı gerçekleştirilirken malzemelerin sıralanmasında referans alınacaktır. Bu kısımda oluşturulacak yüzeyler, daha önce yapılan örneklerde kullanılan malzemeleri içerecektir.

### 6.3.1 Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

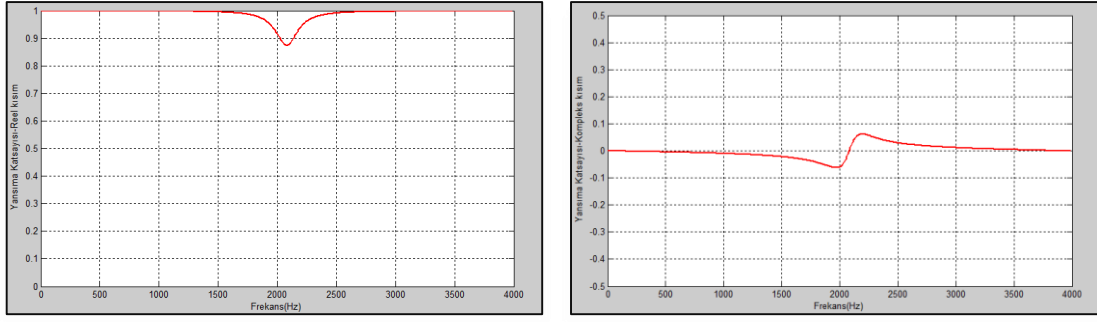
Malzemeleri içeren katmanlı yapının toplam kalınlığı 14 mm olarak ayarlanmıştır. Bu doğrultuda Şekil 6.15'te belirtildiği gibi yüzey 14 katman içerecek ve her katmanın kalınlığı 1 mm olacaktır. Tablo 6.2'de bulunan malzeme özellikleri kullanılacaktır. Oluşturulan yüzeyin sönümlenme ve yansıma katsayısı incelenecektir. Katmanlı yapıda A ile belirtilen malzeme alçıpan, B ile belirtilen malzeme ise cam yünüdür.



Şekil 6.15. Thue-Morse dizisinden faydalanılarak oluşturulan malzeme dizilimi.



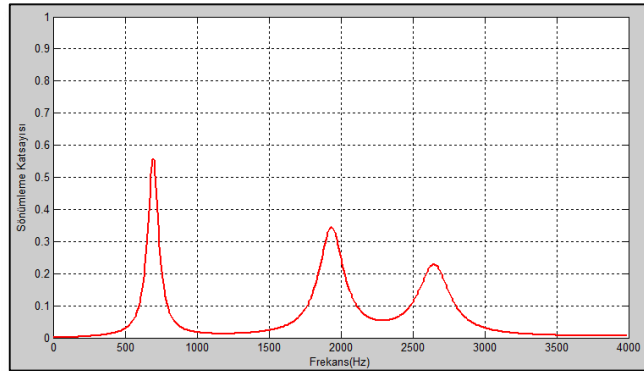
Şekil 6.16. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-cam yünü.



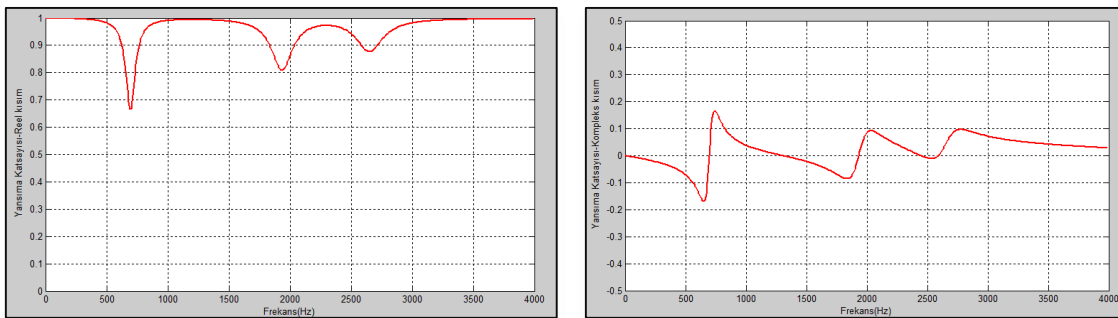
Şekil 6.17. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Yapılan katı-gözenekli malzeme dizilimine sahip örneklerde de benzer sonuçlar gözlenmiştir ve kısaca katmanlı yapının yansıtıcı özelliğinin fazla olduğu tespit edilmiştir. 2081 Hz değeri yüzeyin rezonans frekansına eşittir.

Katı katmanlar arasında gözenekli malzeme olarak cam yünü kullanılmıştır ancak cam yününe göre daha düşük dirence sahip olan plastik köpük kullanıldığında elde edilen görüntüler Şekil 6.18 ve 6.19’da belirtilmektedir. Plastik köpük parametreleri Tablo 6.3’te yer almaktadır.



Şekil 6.18. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-plastik köpük.

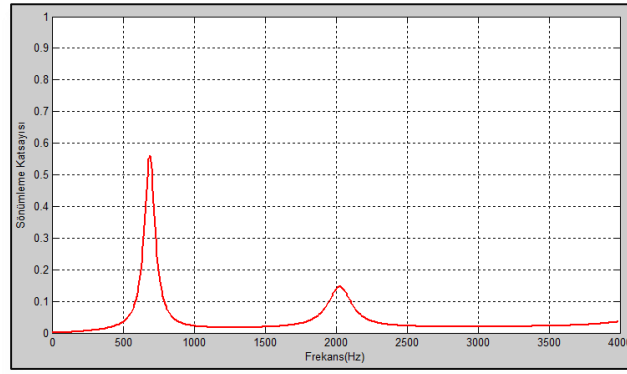


Şekil 6.19. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

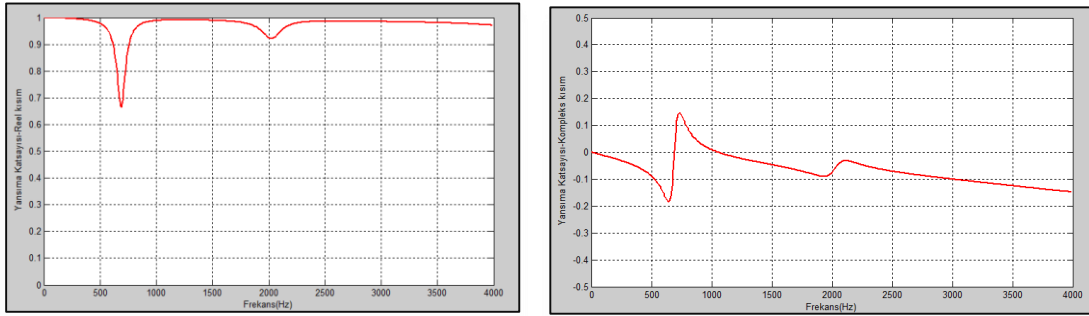
Elde edilen görüntüler doğrultusunda sönümlenme katsayısında iyileşmeyi sağlayan rezonans etkisidir. Rezonans frekans değerleri yaklaşık 701, 1941 ve 2591 Hz'dir.

### 6.3.2 Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Tablo 6.3'te belirtilen malzemeler kullanılacaktır. Şekil 6.15'te belirtilen katmanlı yapıda A ile belirtilen malzeme plastik köpük, B ile belirtilen malzeme ise alçıpan olacaktır. Diğer örneklerde olduğu gibi, oluşturulan yüzeyin sönümlenme ve yansıma katsayıları incelenecektir.



Şekil 6.20. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.

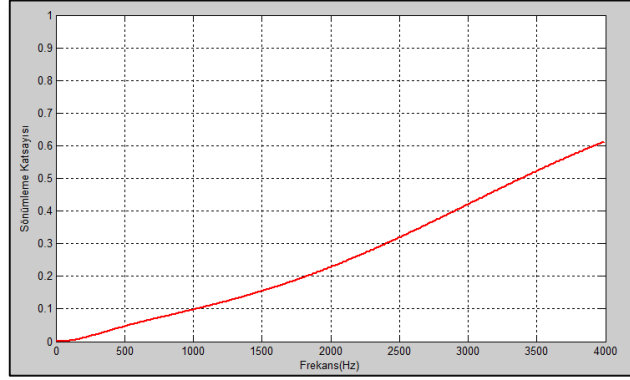


Şekil 6.21. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

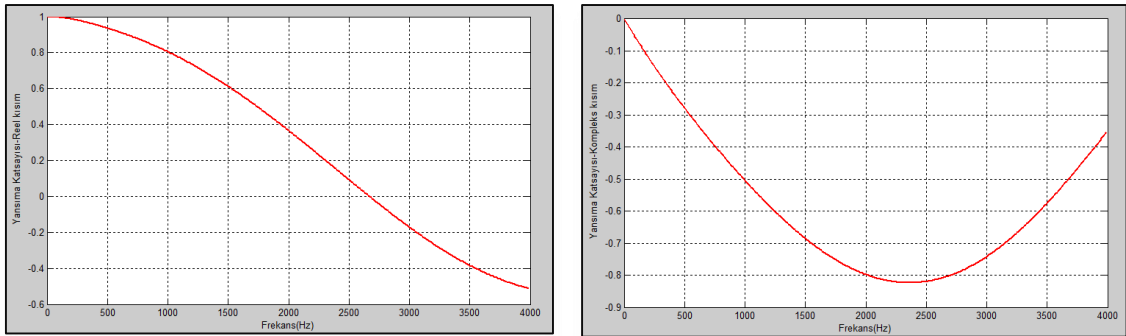
Thue-Morse dizisinin kullanıldığı ve kullanılmadığı örnekler kıyaslandığında, Thue-Morse dizisinin kullanılması sönümlenme katsayısını birden fazla frekans değerinde belirgin gösterse de diğer dizilerin kullanılması yüzeyin sönümlenme davranışı açısından daha faydalı olmuştur. 691 Hz değeri yüzeyin rezonans frekansına eşittir. Genel olarak yüzeyde yansıtıcı özellik baskındır.

### 6.3.3 Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Bölüm 6.2.3'teki gibi, sıvı malzeme olarak bu çalışmada da hava kullanılacaktır. Malzeme özellikleri, Tablo 6.4'te yer almaktadır. Şekil 6.15'te belirtilen malzeme dizilimine uygun katmanlı yapı oluşturularak, yüzeyin sönümlenme ve yansıma katsayıları incelenecektir.



Şekil 6.22. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.



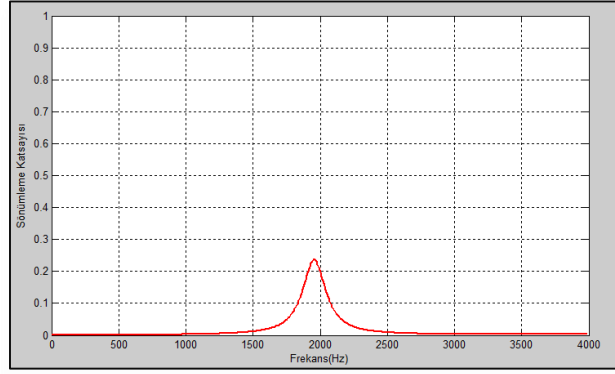
Şekil 6.23. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Yapılan örnekte, sönümlenme katsayısında yaklaşık olarak doğrusal artış tespit edilmiştir ancak Bölüm 6.2.3'te yapılan çalışmadan, sönümlenme özelliği açısından daha iyi sonuç alınmıştır.

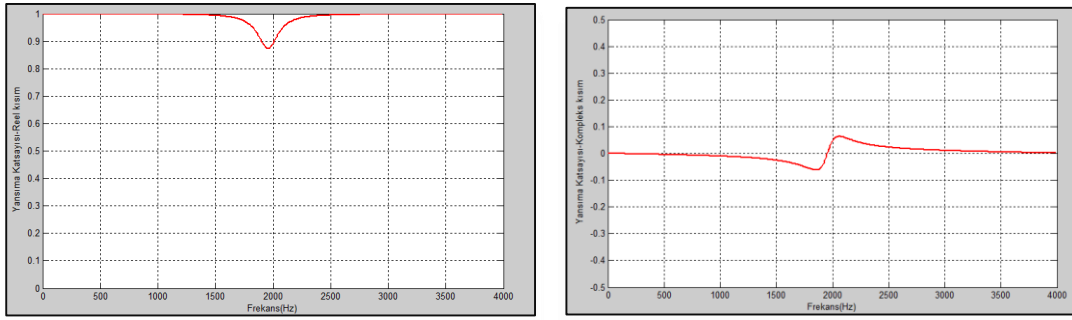
## 6.4 Periyodik Dizilen Malzemelerin Kullanıldığı Çok Katmanlı Yüzey Tasarımı

### 6.4.1 Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Bu kısımda malzeme dizilimi ABABABABABABABAB şeklinde. Toplamda 14 katmandan oluşmaktadır. A katmanında yer alan malzeme alçıpan, B katmanında yer alan malzeme ise cam yünüdür. Her bir malzemenin kalınlığı 1 mm olarak ayarlanmıştır. Elde edilen çıktılar, Şekil 6.24 ve 6.25'te belirtilmiştir. Tablo 6.2'de bulunan malzeme özellikleri kullanılacaktır.



Şekil 6.24. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-cam yünü.



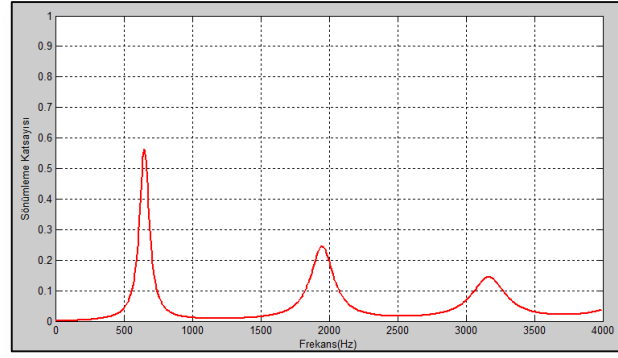
Şekil 6.25. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Yüzeyin yansıtıcı özelliği, genel frekans aralığına bakıldığında baskın görünmektedir. Yüzeyin sönümlenme özelliği minimum seviyelerdedir. 1951 Hz noktası rezonans frekans değeridir.

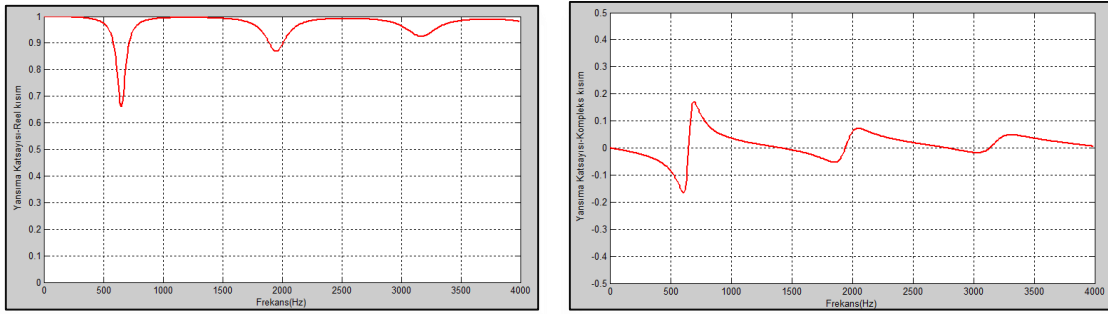
Katı katmanlar arasında gözenekli malzeme olarak cam yünü kullanılmıştır ancak cam yününe göre daha düşük dirence sahip olan plastik köpük kullanıldığında elde edilen görüntüler Şekil 6.26 ve 6.27'de belirtilmektedir. Plastik köpük parametreleri Tablo 6.3'te yer almaktadır.

Şekil 6.26'da belirtildiği gibi birden fazla frekans değerinde sönümlenme davranışı belirgin olarak gözlemlenmiştir. Spesifik artışın gözlemlendiği rezonans frekans değerleri yaklaşık olarak 651 Hz, 1961 Hz ve 3141 Hz'dir. Bu frekans değerleri dışındaki frekans aralıklarında yüzeyin yansıtıcı özelliği baskındır.





Şekil 6.26. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-plastik köpük.

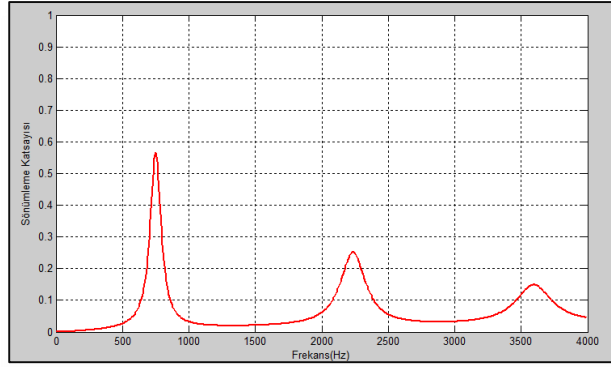


Şekil 6.27. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

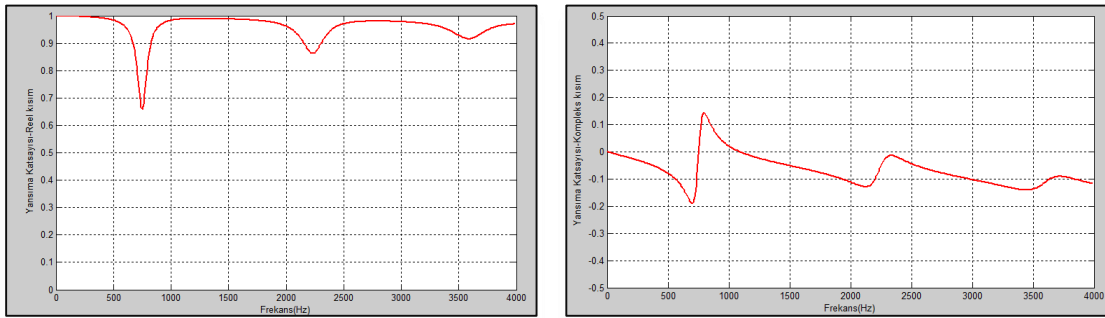
#### 6.4.2 Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Tablo 6.3'te belirtilen malzemeler ve özellikleri kullanılacaktır. Katmanlı yapı oluşturulurken malzeme sıralaması değiştirilmiştir. Yüzeyin sönümlenme ve yansıma katsayıları incelenecektir.

Şekil 6.28'de belirtilen çıktı, Thue-Morse dizisinin kullanıldığı çalışma ile karşılaştırıldığında, sönümlenme katsayısının belirgin olduğu frekans sayısında artış olmuştur ancak yansıma özelliği geniş frekans bandında baskınlığını korumaktadır. 751 Hz frekans değerinde rezonans tespit edilmiştir.



Şekil 6.28. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.

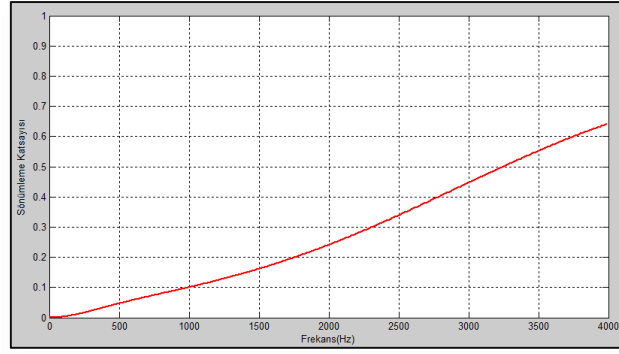


Şekil 6.29. Gözenekli-katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansımaya katsayısı.

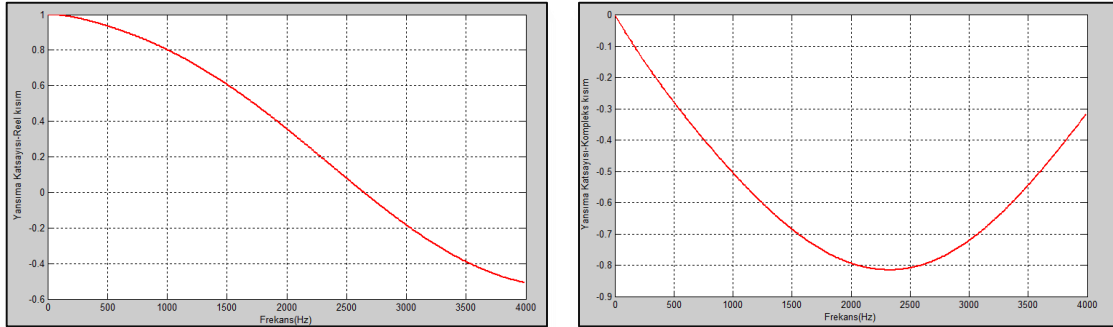
### 6.4.3 Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Bu çalışmada, Tablo 6.4'te belirtilen plastik köpük ve hava kullanılacaktır. Oluşturulan yüzeyin sönümlenme ve yansımaya katsayıları incelenecektir.

14 katmanlı yüzey oluşturulurken periyodik malzeme diziliminin kullanılması, yüzeyin sönümlenme davranışında Şekil 6.30'da belirtildiği gibi yaklaşık doğrusal artış sağlamıştır. Katı ve gözenekli malzeme dizilimlerine göre sönümlenme davranışı açısından iyileşme sağlanmıştır. Yüzeyin yansımaya özelliği genel olarak düşük seviyelerde gözlenmiştir.



Şekil 6.30. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.



Şekil 6.31. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

### 6.5 Dragon Eğri Dizisi Kullanılarak Oluşturulan Yüzey Tasarımları

0 ve 1' lerle tanımlı olan sonsuz uzunluktaki bir dizidir. Dizi için tanımlı olan  $k = n.2^m$  eşitliği kullanılır. “n” ile belirtilen değişkenin tek sayı olması gerekmektedir.

$$t_k = \begin{cases} 1, & n = 1(\text{mod } 4) \\ 0, & n = 3(\text{mod } 4) \end{cases}$$

(6.2)

Belirtilen ifade doğrultusunda birkaç örnek verilirse;

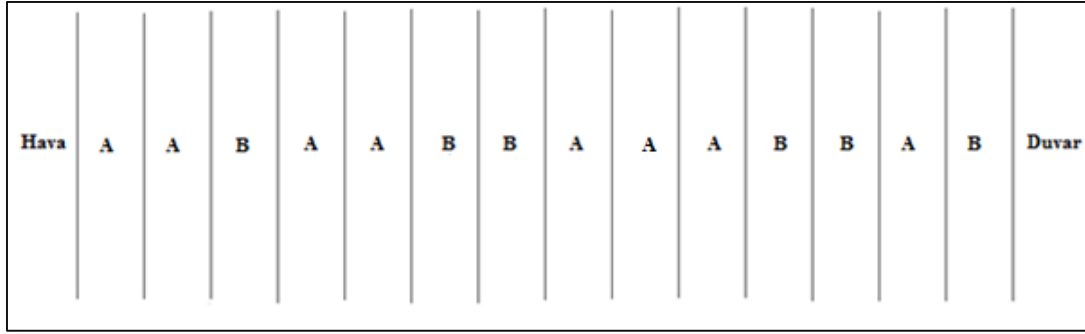
$$t_3 = t_7 = t_{11} = 0 \quad , \quad t_9 = t_{10} = t_{13} = 1.$$

İlk terimden itibaren dizinin elemanları 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0... olarak sıralanmaktadır [24].

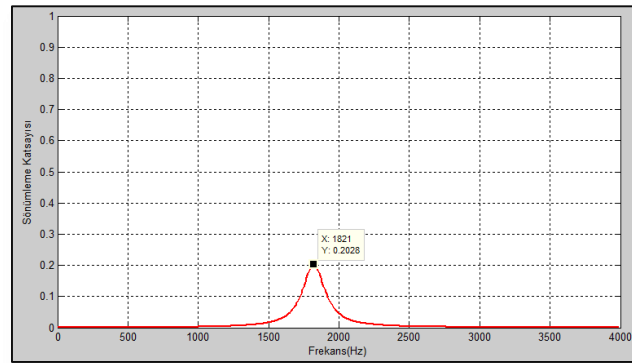
Tasarlanacak yüzeylerin malzeme sıralamasında Dragon eğri dizisinden faydalanılmaktadır. Oluşturulan yüzeylerin sönümlenme ve yansıma katsayılarının durumu incelenecektir.

### 6.5.1 Katı-Gözenekli Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

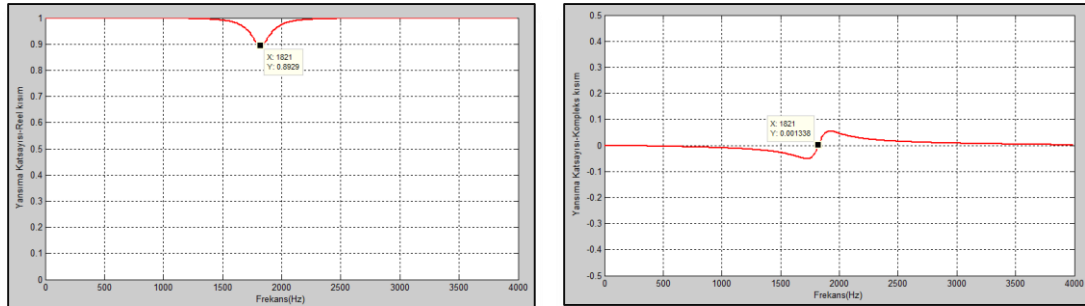
Malzeme ortamında diğer örneklerde olduğu gibi 14 katman yer alacak ve toplam kalınlık 14 mm olacaktır. Şekil 6.32’de belirtilen A malzemesi alçıpan, B malzemesi ise cam yünüdür. Malzeme özellikleri Tablo 6.2’de yer almaktadır. Yüzeyin sönümlenme ve yansıma katsayıları incelenecektir.



Şekil 6.32. Dragon eğri dizisinden faydalanılarak oluşturulan malzeme dizilimi.



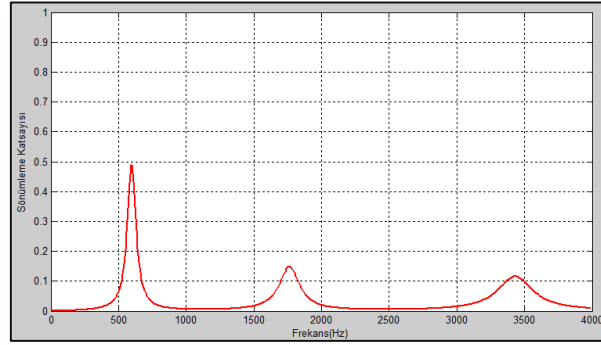
Şekil 6.33. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-cam yünü.



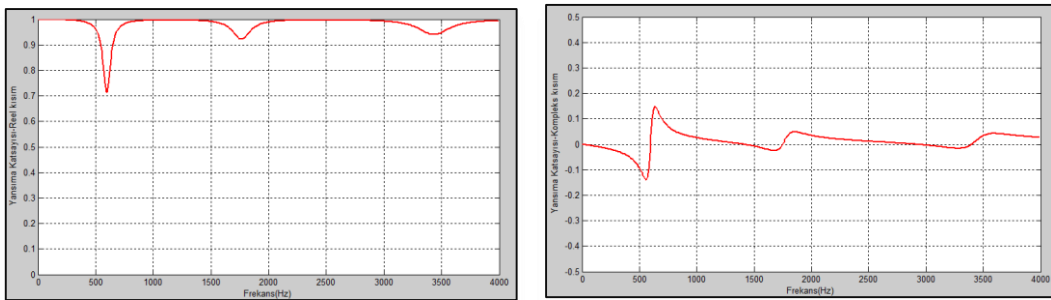
Şekil 6.34. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Kullanılan dizinin Baum-Sweet dizisinden tek farkı 9. katmandaki malzemenin burada farklı malzeme tipine karşılık gelmesidir. Yapılan örnekte 9. katmanda katı malzeme yer almaktadır. Elde edilen grafikler, Baum-Sweet dizisi referans alınarak oluşturulan yüzeyin davranışları ile karşılaştırıldığında, malzemenin sahip olduğu yansıtıcı özelliğinde artış gözlenmiştir. Yüzeyin rezonans frekansı yaklaşık 1821 Hz olarak tespit edilmiştir, kısaca rezonans frekansında bir miktar sağa kayma durumu gerçekleşmiştir. Genel olarak elde edilen çıktılar benzerdir.

Katı katmanlar arasında gözenekli malzeme olarak cam yünü kullanılmıştır ancak cam yününe göre daha düşük dirence sahip olan plastik köpük kullanıldığında elde edilen görüntüler Şekil 6.35 ve 6.36'da belirtilmektedir. Plastik köpük parametreleri Tablo 6.3' te yer almaktadır.



Şekil 6.35. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-plastik köpük.



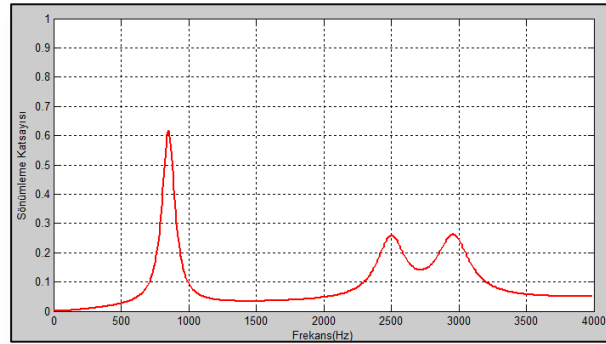
Şekil 6.36. Katı ve gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Elde edilen çıktılar doğrultusunda, sönümlenme katsayısı minimum seviyelerdedir. Yaklaşık 601, 1761 ve 3431 Hz değerlerinde katmanlı yapıda rezonans etkisi gözlenmiştir.

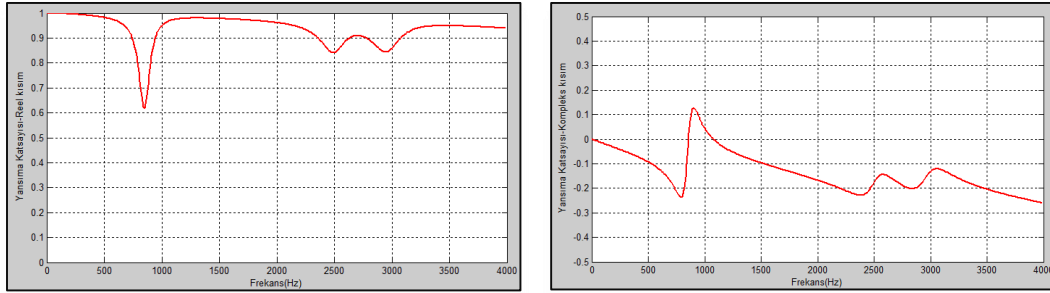
## 6.5.2 Gözenekli-Katı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Şekil 6.32’de belirtilen malzeme dizilimi, Tablo 6.3’te belirtilen malzemeler ve özellikleri kullanılacaktır. Yüzeyin sönümlenme ve yansımaya katsayıları incelenecektir.

Şekil 6.37’de belirtilen grafik incelendiğinde, yüzeyin sönümlenme katsayısı yaklaşık 851, 2501 ve 2951 Hz noktalarında maksimum değerlerine ulaşmıştır. Yapının ilk iki katmanında gözenekli malzemenin yer alması sönümlenme katsayısı grafiğinde iyileşme sağlamıştır. Yansımaya katsayısı, yüzeyin sönümlenme katsayısının belirgin olduğu frekans aralığı dışında genel olarak maksimum seviyelerde gözlenmiştir.



Şekil 6.37. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.

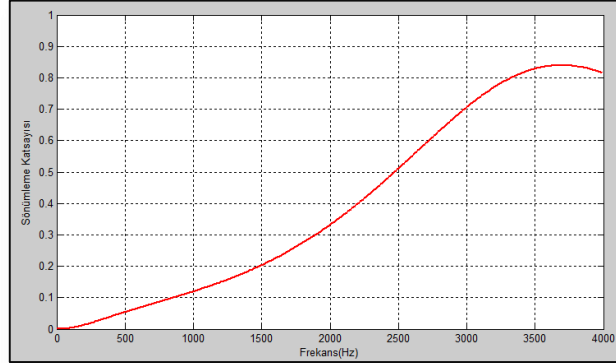


Şekil 6.38. Gözenekli ve katı malzemelerden oluşan yüzeyin yansımaya katsayısı.

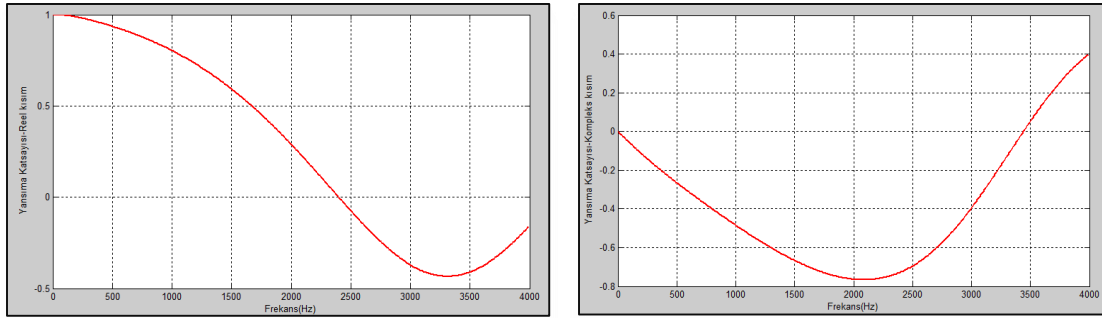
851 Hz değerinde rezonans durumu gözlenmiştir. Baum-Sweet dizisi kullanılarak oluşturulan yüzey ile karşılaştırıldığında, sönümlenme katsayısının maksimum olarak gözlemlendiği rezonans frekans değerinde düşüş gözlenmiştir. Bunun yanı sıra sönümlenme katsayısı değerleri tüm frekans aralığında belirgin olarak artmıştır.

### 6.5.3 Gözenekli-Sıvı Malzeme Sıralamasının Olduğu Yüzey

Şekil 6.32’de belirtilen malzeme dizilimi ve Tablo 6.4’te belirtilen malzeme özellikleri kullanılacaktır. Yüzeyin sönümlenme ve yansıma katsayıları incelenecektir.



Şekil 6.39. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı.



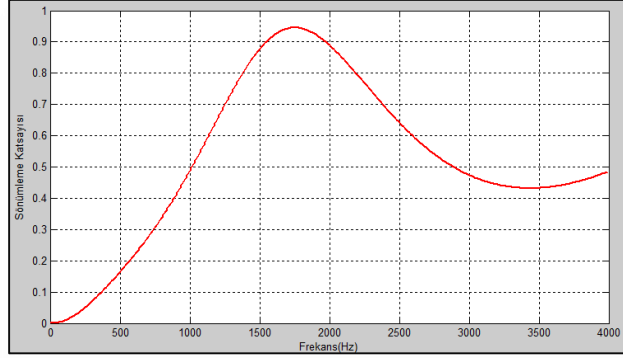
Şekil 6.40. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin yansıma katsayısı.

Baum-Sweet dizisi kullanılarak oluşturulan yüzey ile karşılaştırıldığında, küçük farklılıklarda olsa çıktılarda iyileşme sağlanmış olup sönümlenme davranışı maksimum seviyede gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, katmanlı yapının en yüksek sönümlenme davranışı gösterdiği ortam, gözenekli-sıvı malzemelerin bir arada olduğu durumda elde edilmiştir. Sönümlenme davranışı üzerinde en etkili olan malzeme sıralaması Dragon eğri dizisi ile sağlanmıştır. Katman kalınlığının artırılması durumunda gözenekli-sıvı malzemelerin bir arada kullanıldığı yapının sönümlenme davranışı ayrıca incelenecektir.

Şekil 6.32’de belirtilen malzeme sıralamasındaki her bir katmanın kalınlığı 2 mm olacak şekilde artırıldığında, toplam malzeme kalınlığı 28 mm olmaktadır. Tablo 6.4’te yer alan malzeme özellikleri kullanılmaktadır. 28 mm kalınlığında olan malzeme ortamının sönümlenme katsayısı Şekil 6.41’de belirtilmiştir.

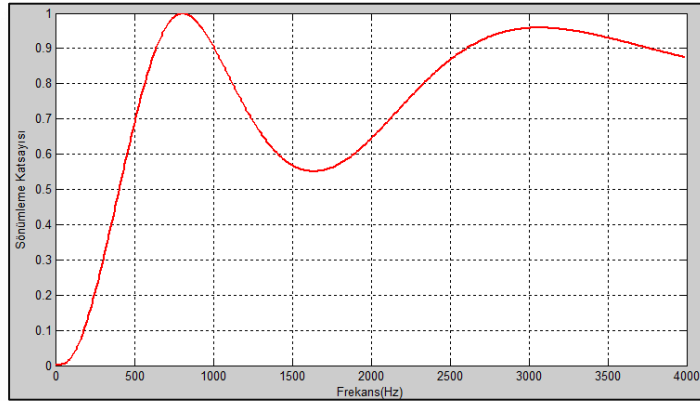
Şekil 6.41'e göre katmanlı yapının kalınlığının artırılması, sönümlenme özelliğinin düşük frekanslarda baskınlığını artırmıştır.



Şekil 6.41. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-28 mm.

Şekil 6.32'de belirtilen malzeme sıralamasındaki her bir katmanın kalınlığı 4 mm olacak şekilde artırıldığında, toplam malzeme kalınlığı 56 mm olmaktadır. Tablo 6.4'te yer alan malzeme özellikleri kullanılmaktadır. Belirtilen yüzeyin sönümlenme katsayısı Şekil 6.42'de belirtilmiştir.

Katman kalınlığının 56 mm olduğu durumda sönümlenme özelliği, ilgili frekans aralığı için maksimum seviyelerde gözlenmiştir.



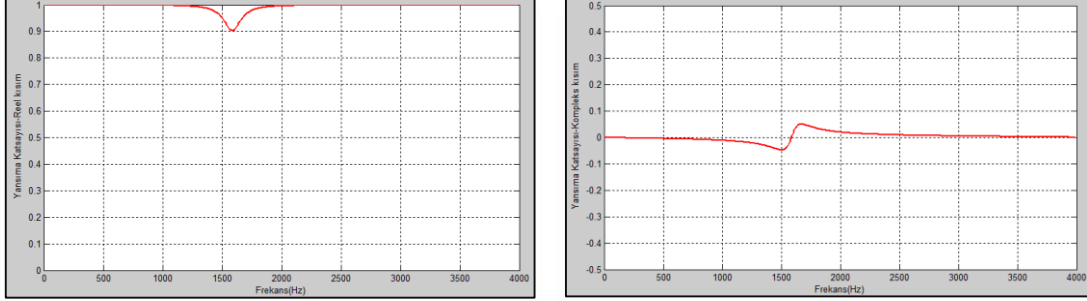
Şekil 6.42. Gözenekli-sıvı malzemelerden oluşan yüzeyin sönümlenme katsayısı-56 mm.

Yüzeyin yansıtıcı özelliğinin maksimum seviyede gözlemlendiği durum, katı-gözenekli malzemelerin Dragon eğrisine göre dizilmesiyle elde edilmiştir. Şekil 6.32'de yer alan dizilim ve Tablo 6.2'deki malzeme özellikleri kullanılarak 28, 56 mm kalınlıklarında iki malzeme ortamı oluşturulmaktadır. Ortamların her birinde 14 katman yer almaktadır. 28 mm



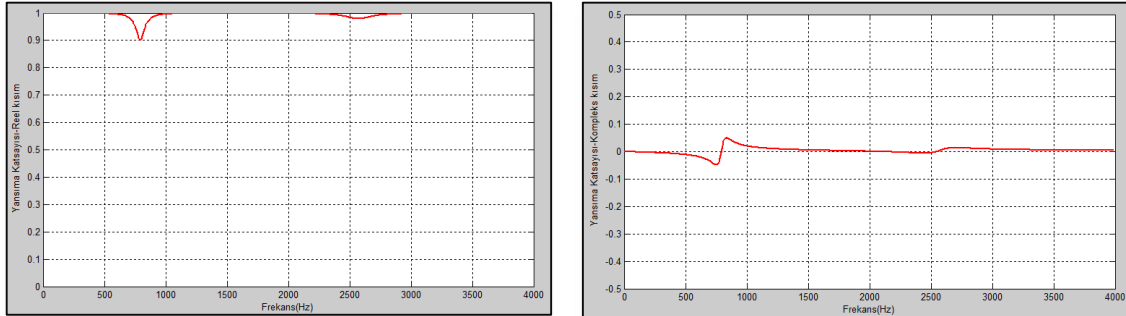
kalınlığındaki ortamda yer alan her bir katmanın kalınlığı 2 mm, 56 mm kalınlığındaki ortamda bulunan her bir katman kalınlığı ise 4 mm'dir.

Yüzeylerin yansımaya katsayıları Şekil 6.43 ve 6.44'te belirtilmiştir.



Şekil 6.43. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansımaya katsayısı-28 mm.

Elde edilen çıktılar doğrultusunda, katman kalınlığı arttıkça malzemenin yansımaya katsayısının azaldığı frekans değeri, sola kaymıştır. 1602 Hz frekans değeri yüzeyin rezonans frekansıdır. Bu frekans değeri dışında yüzey, ilgili frekans aralığı için yansıtıcı özellik göstermektedir.



Şekil 6.44. Katı-gözenekli malzemelerden oluşan yüzeyin yansımaya katsayısı-56 mm.

Şekil 6.44'te belirtilen çıktı doğrultusunda, katmanlı yapının rezonans frekansları (801, 2551 Hz) dışındaki frekans aralığında tamamen yansıtıcı özellik gösterdiği tespit edilmiştir.

## 7. DEĞERLENDİRME VE GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, ses yansıtıcı ve yutucu yüzey tasarımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Tasarlanan yüzeylerde katı, sıvı ve gözenekli malzeme tipleri kullanılmıştır. Katmanlı yapılar katı-gözenekli, gözenekli-katı ve gözenekli-sıvı malzeme çiftleriyle oluşturulmuştur. Kullanılan malzeme tiplerine bağlı olarak yüzeyin yansıtıcı ve sönümleme özelliğinin belirgin olarak gözlemlendiği durumlar elde edilmiştir. Yapılan örneklerde yüzey kalınlığı 14 mm olarak belirlenmiş olup buna bağlı olarak farklı malzeme sıralamaları ile katmanlı yapılar tasarlanmıştır. Katmanlı yapılar oluşturulurken Baum-Sweet, Thue-Morse ve Dragon eğri dizilerinden faydalanılmıştır. Ayrıca iki farklı tip malzemelerin periyodik dizilimi kullanılarak katmanlı yapı oluşturulmuştur.

İlk etapta katı-gözenekli malzeme sıralamasının akustik davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, katı malzemelerin yansıtıcı özelliğinin baskın olduğu gözlemlenmiştir. Katı malzemelerin katmanlı yapıda bulunduğu yerler, yüzey ile ilgili akustik parametre hesaplamalarını etkilediğinden dolayı sönümleme performansı yüksek bir yüzey oluşturulacak ise, katmanlı yapıda katı malzemelerin kullanılması önerilmemektedir. Bu durumun tersi olarak, yansıtıcı yüzey tasarımı gerçekleştirilecek ise yüzey katı malzemelerden oluşmalıdır. Katmanlı yapıda kullanılan gözenekli malzemelerin akış direncinin etkisini görmek amacıyla cam yünü ve plastik köpük malzemeleri kullanılmıştır. Katı malzemeler ile kullanıldıklarında cam yünü malzemesi sönümleyici etki sağlayamamıştır ancak plastik köpük malzemesi katmanlı yapıda rezonans etkisinin belirgin olarak görülmesine yardımcı olmuştur.

Malzeme sıralamasının gözenekli-katı olduğu durumda, gözenekli malzemelerin katmanlı yapının ilk katmanında bulunması sönümleme davranışını olumlu yönde etkilemiştir, ancak katmanlı yapıda katı malzemenin bulunmasından dolayı belirli frekans değerleri dışında yüzeylerin yansıtıcı özelliğinin baskın olduğu gözlemlenmiştir.

Son olarak, gözenekli-sıvı malzeme sıralamasının kullanıldığı yüzey tasarımlarında, yüzeyin sönümleme özelliği maksimum seviyede gözlemlenmiştir. Sönümleyici yüzey tasarımlarında gözenekli malzemeler ile havanın birlikte kullanılması tercih edilmelidir.

Elde edilen grafikler doğrultusunda sönümleme özelliği, malzeme sıralamasının farklılığına bağlı olarak birden fazla frekans değerinde veya frekans aralığında belirgin seviyede tespit edilmiştir. Gözlenen frekans değerlerinin içinde yüzeyin rezonans özelliği gösterdiği frekans

değerleri de mevcuttur. Yüzeyin yansıtma katsayısı ve empedans değeri rezonans özelliği gösterdiği noktalarda azalmaktadır.

Katı-sıvı malzeme sıralaması literatürde yer alan akustik yüzey tasarımları bölümünde incelenmiş ancak çalışmanın devamında katı malzemenin sıvı malzemeye göre yansıtıcı özelliğinin çok belirgin olmasından dolayı farklı dizilimlerle oluşturulan tasarımlarda yer verilmemiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, katmanlı yapının sönümlenme özelliğini ön plana çıkaran malzeme çifti gözenekli-sıvı malzeme, malzeme sıralaması Dragon eğri dizisi olarak tespit edilmiştir. Yansıtma açısından yüzeyin yansıtma özelliğinin maksimum seviyede gözlemlendiği malzeme çifti katı-gözenekli malzeme, malzeme sıralaması ise yine Dragon eğri dizisiyle elde edilmiştir.

Dragon eğri dizisi referans alınarak oluşturulan gözenekli-sıvı ve katı-gözenekli malzeme çiftlerinin yer aldığı katmanlı yapıdaki malzeme kalınlıklarının artırılmasına yönelik denemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, katı-gözenekli malzeme çiftinin yer aldığı katmanlı yapıda ortam kalınlığı artırılrsa da yüzey, rezonans frekansı dışındaki frekanslarda baskın yansıtıcı özellik göstermiştir. Gözenekli-sıvı malzeme çiftinden oluşan katmanlı yapıda ise ortam kalınlığı arttıkça yüzeyin sönümlenme özelliği, düşük frekans değerlerine kayarak gözlenen frekans aralığının tamamı için maksimum seviyelere yükselmiştir.

Bu tez çalışmasının devamında, farklı malzemeler ve dizilimler kullanılarak yeni akustik yüzey tasarımları yapılabilir ve güncel uygulamalar için önerilebilir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa, Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials, Mechanical Engineering Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., Takatsukadai 1-chome Nishi-ku, Kobe, 673-02, Japan, **1989**.
- [2] M. E. Delany and E. N. Bazley, Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex (Gt. Britain), **1969**.
- [3] J. F. Allard and N. Atalla, Propagation of Sound in Porous Media, Second Edition, A John Wiley and Sons Ltd. Publication, **2009**.
- [4] A. Wareing, Acoustical Modeling of Rooms with Extended-Reaction Surfaces, Master of Applied Science, The University of British Columbia, Canada, **2000**.
- [5] J.F. Allard, B. Brouard, D. Lafarge, A General Method of Predicting Surface Impedance and Transmission Loss in Layered Media, Laboratoire d'Acoustique, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, BP 535, 72017 Le Mans Cedex, France, **1995**.
- [6] M. Abid and M. S. Abbes, J. D. Chazot, L. Hammemi, M. A. Hamdi, M. Haddar, Acoustic Response of a Multilayer Panel with Viscoelastic Material, International Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 17 (**2012**) 82 – 89.
- [7] S. Luo, Q. Huang, Acoustic Absorption of Multi-Layer Structure Composed of Porous Layers Based on Biot's Model and Transfer Matrix Method, Acta Acustica United with Acustica Vol. 99 (**2013**) 751 – 758.
- [8] S. Luo, Q. Huang, Resonance Variation of Double-Layer Structure Composed of Porous Material and Air Layer Based on Biot Theory, Acta Acustica United with Acustica Vol. 100 (**2014**) 477 – 484.
- [9] B. Brouard, D. Lafarge and J. F. Allard, A General Method of Modelling Sound Propagation in Layered Media, Journal of Sound and Vibration 183(1) (**1995**) 129 – 142.
- [10] Anonim, Lumen Physics, <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/17-3-sound-intensity-and-sound-level/> (Erişim tarihi : **25 Ocak 2020**).
- [11] I. L. Vér, L. L. Beranek, Noise and Vibration Control Engineering : Principles and Applications, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. , **2006**.
- [12] G. T. VİDİNLİMEN, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Gözenekli Malzemelerin Akustik Özellikleri ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2010**.
- [13] J. P. Arenas, M. J. Crocker, Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, Journal of Sound and Vibration 44 (7) (**2010**) 12 – 17.

- [14] Anonim, Khan Academy, <https://www.khanacademy.org/science/>, (Erişim tarihi : **16 Şubat 2020**).
- [15] P. S. Liu, G. F. Chen, Porous Materials Processing and Applications, First Edition, Elsevier Inc. , **2014**.
- [16] A. Kia, H. S. Wong, C. R. Cheeseman, Clogging in permeable concrete: A review, Journal of Environmental Management 193 (**2017**) 221 – 233.
- [17] Anonim, APMR : Acoustical Porous Material Recipes, <https://apmr.matelys.com/index.html>, (Erişim tarihi : **23 Şubat 2020**).
- [18] C. Depollier, J. F. Allard, W. Lauriks, Biot Theory and Stress-Strain Equations in Porous Sound-Absorbing Materials, The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 84, No. 6 **1988**.
- [19] Y. Li, S. Ren, Building Decorative Materials, First Edition, Woodhead Publishing, **2011**.
- [20] V. Moody and H. L. Needles, Tufted Carpet Textile Fibers, Dyes, Finishes, and Processes, First Edition, William Andrew Publishing, New York, U.S.A, **2004**.
- [21] A. J. B. Tadeu \*, D. M. R. Mateus, Sound Transmission through Single, Double and Triple Glazing. Experimental evaluation, Applied Acoustics 62 (**2001**) 307 – 325.
- [22] L. Merta, Composition Inverses of the Variations of the Baum–Sweet Sequence, Theoretical Computer Science 784 (**2019**) 81 – 98.
- [23] J. P. Allouche, J. Shallit, Automatic Sequences Theory, Applications, Generalizations, First Edition, Cambridge University Press, **2003**.
- [24] G. Everest, A. Poorten, I. Shparlinski, T. Ward, Recurrence Sequences, American Mathematical Society, Vol. 104, **2003**.

### **Tezden Türetilmiş Bildiriler**

- Thue-Morse Dizilimli Çok Katmanlı Akustik Yüzey Tasarımı, İlk Bildiriler Konferansı, Temmuz 2021, Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Özden DOĞRUER
Doğum yeri	ANKARA
Doğum tarihi	12/04/1993
Medeni hali	Bekar
Elektronik posta adresi	ozdendogruer@gmail.com
Yabancı dili	İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans	Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (2011-2016)
Yüksek Lisans	Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (2017-2021)

### İŞ TECRÜBESİ

2017-2018 VESTEL SAVUNMA

2018-... ASELSAN A.Ş.