

**ÇOK KATMANLI YAPILARDA SES DALGASI
YAYILIMININ İNCELENMESİ**

**ANALYSIS OF SOUND PROPAGATION IN
MULTILAYERED STRUCTURES**

GAMZE DAĞ

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.

2017

GAMZE DAĞ' in hazırladığı "**Çok Katmanlı Yapılarda Ses Dalgası Yayılımının İncelenmesi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali KARA
Başkan



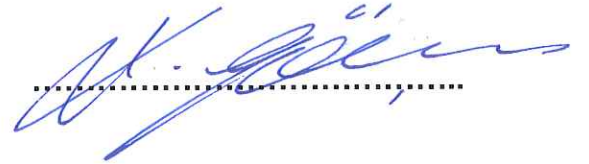
Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL
Danışman



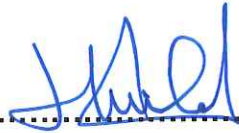
Doç. Dr. Umut SEZEN
Üye



Yrd. Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN
Üye



Yrd. Doç. Dr. Hüsnü DAL
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenекle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

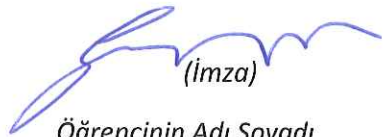
- Tezimin/Raporumun 02.01.2017 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumuntarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

02 / 01 / 2017


(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Gamze DAĞ

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

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

beyan ederim.

14/09/2017



Gamze DAĞ

ÖZET

ÇOK KATMANLI YAPILARDA SES DALGASI YAYILIMININ İNCELENMESİ

Gamze DAĞ

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Eylül 2017, 71 Sayfa

Günümüzde endüstriyel ve çevresel gürültü dolayısı ile akustik yalıtım oldukça önemli hale gelmiştir. Akustik özelliklerin önemli olduğu konut, otomotiv, beyaz eşya gibi sektörlerin yanında, akustik gizliliğin de önem arz ettiği savunma sanayisinde de akustik yalıtım malzemeleri ve akustik sönüm sistemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Katı, sıvı ve gözenekli özelliğe sahip çok katmanlı yapılar, çeşitli mühendislik uygulamalarında ses yalıtımı amaçlı kullanılmaktadır. Kaplamalı panel yapısı üzerinden ses aktarımı problemi literatürde kapsamlı olarak incelenmiştir; fakat çok katmanlı yapılarda ve özel dizilimlere göre sıralanmış çok katmanlı yapılarda ses yayılımının incelenmesi yeni bir araştırma konusudur. Bu tez çalışmasında çok katmanlı olarak sıralanan ve özel dizilimlere sahip çok katmanlı yapılar, özellikle sınır koşullarına ve yüzey karakteristik özelliklerine dikkat edilerek Transfer Matris Metodu (TMM) ile modellenmiş ve yapının ses yapı etkileşimi incelenmiştir. Akustik yalıtım performansı, aynı malzeme ve eş katman kalınlığı ile oluşturulmuş, iki katmanlı yapılarla çok katmanlı yapılar arasında karşılaştırılmış ve katman sayısının akustik performansa etkisi incelenmiştir. Yapıların özel dizilimlere göre sıralanmasının akustik performansa etkisinin incelenmesi için, aynı malzeme ve eş katman kalınlığı ile oluşturulmuş iki katmanlı yapı ile Fibonacci Serisi diziliminin farklı

kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı yapıların akustik performansları karşılaştırılmıştır. Son olarak, özel dizilimlere göre sıralanan yapıların kendi aralarında akustik performanslarının analizi yapılmıştır. Bu süreçte çok katmanlı yapılar; aynı malzeme, eş katman kalınlığı ve eş katman sayısı ile Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşaklarına göre sıralanmıştır. Her bir kuşak için akustik performans incelenerek, ses yapı etkileşimi karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Katmanlı Yapı Ses Yayılımı, Akustik Performans, Transfer Matris Metodu (TMM), Çok Katmanlı Yapı, İki Katmanlı Yapı, Fibonacci Serisi, Transfer Kaybı, Katı Malzeme, Sıvı Malzeme, Gözenekli Malzeme, Katmanlar Arası Hava Aralığı

ABSTRACT

ANALYSIS OF SOUND PROPAGATION IN MULTILAYERED STRUCTURES

Gamze DAĞ

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

October 2017, 71 pages

Acoustic insulation due to industrial and environmental noise has become very important nowadays. These types of acoustic insulation materials and acoustic damping systems are frequently used in sectors such as housing, automotive, and white goods, as well as in the defense industry where acoustic secrecy is also important. Multi-layer structures with solid, liquid and porous properties are used for insulation in various engineering applications. The problem of sound transmission over the veneered panel structure has been extensively investigated in the literature, but the study of sound propagation in multilayered structures, which are layered in a special sequence, is a new research topic. In this thesis, multi-layered structures, which are layered in a special sequence, were modeled considering boundary conditions and surface characteristics using Transfer Matrix Method (TMM). In that way, sound structure interaction and acoustical performance was analyzed. The acoustic insulation performance was comprised between two-layer structures and the multi-layered structures, which are made of same materials and same total layer thickness to analyze effects of layer numbers on acoustic performance. In order to examine the effect of special sequence layered structures on acoustic performance, multi-layer structures were

arranged according to the different generations of the Fibonacci Sequence and compared with the two-layer structures, which are formed with the same material and the same total layer thickness. Finally, the sound structure interactions of the multilayer structures, which are ordered by different generations of the Fibonacci Series with same material, same total layer thickness and same number of layers, were compared among themselves to analyze which Fibonacci Sequence generation has best acoustic insulation performance.

Keywords: Sound Propagation in Multilayer Structure, Acoustic Performance, Transfer Matrix Method (TMM), Multilayered Structures, Double Layered Structures, Fibonacci Series, Transmission Loss, Solid Materials, Fluid Materials, Porous Materials, Layered Structures with Air Gap

TEŐEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında değerli katkı ve eleőtirileriyle yol gosteren, sonsuz sabrıyla beni her zaman çalıőmaya teővik eden, tezin tamamlanmasında buyk emeği geçen danışmanım Sayın Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL'e içtenlikle teőekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden hiç bir desteğini esirgemeyen, hayatım boyunca, her zaman yanımda olup verdikleri her türlü destek için kıymetli annem Cemile ERDAŐ'a ve kardeőim Müge DAĞ'a sonsuz teőekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xiii |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 2.LİTERATÜR ÖZETİ | 4 |
| 3.SES YAYILIM TEORİSİ..... | 9 |
| 3.1.Temel Ses Bilgileri ve Temel Akustik Malzemeler | 9 |
| 3.1.1.Endüstride Kullanılan Temel Akustik Malzemeler | 9 |
| 3.1.2.Ses Ölçümlerinde Kullanılan Temel Parametreler | 10 |
| 3.2.Ses İletim Teorisine Giriş..... | 13 |
| 3.2.1.Katmanlı Ortamda Sesin Yayılımı ve Dalga Denklemleri | 13 |
| 3.2.1.1.Sıvı Katmanda Ses Dalga Denklemleri | 16 |
| 3.2.1.2.Katı Katmanda Ses Dalga Denklemleri..... | 17 |
| 3.2.1.3.Gözenekli Katmanda Ses Dalga Denklemleri | 19 |
| 3.2.2.Çok Katmanlı Yapılarda Sesin Yayılımı ve Dalga Denklemleri..... | 22 |
| 3.2.3.Ses Dalgası İçin Yansıma Katsayısı, Transfer Katsayısı ve Transfer Kaybı Hesaplamaları | 27 |
| 3.2.3.1.Ses Dalgası İçin Yansıma Katsayısının Hesaplanması..... | 27 |
| 3.2.3.2.Ses Dalgası İçin Transfer Katsayısının Hesaplanması | 27 |
| 3.2.3.3.Ses Dalgası İçin Transfer Kaybının Hesaplanması | 28 |
| 3.2.4.Çok katmanlı Yapılarda Katmanlar Arası Sınır Koşul Denklemleri ve Arayüz Matrisleri | 28 |
| 4.TRANSFER MATRİS METODU | 32 |
| 4.1.Transfer Matris Metodu Uygulaması | 32 |
| 4.2.Transfer Matris Metodu Algoritması..... | 32 |
| 5.LİTERATÜRDE TEK VE ÇOK KATMANLI YAPILARLA İLGİLİ TASARIMLAR | 34 |
| 5.1.Literatürde Kullanılan Tek Katmanlı Yapıların Akustik Performans Analizleri | 34 |
| 5.2.Literatürde Kullanılan Çok Katmanlı Yapıların Akustik Performans Analizleri..... | 39 |
| 6.ÇOK KATMANLI YENİ YAPILARIN AKUSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ .. | 47 |

| | |
|--|----|
| 6.1.Eş kalınlıkta İki Katmanlı Yapı ile Çok Katmanlı Periyodik Dizilimli Yapının Akustik Performans Analizi | 47 |
| 6.1.1.Gözenekli İki Katmanlı Yapı ile Gözenekli Çok Katmanlı Yapının Akustik Performanslarının Karşılaştırılması | 47 |
| 6.1.2.Aralarında Hava Boşluğu Bulunan Katı İki Katmanlı Yapı ile Katı Çok Katmanlı Yapının Akustik Performanslarının Karşılaştırılması | 50 |
| 6.2.Fibonacci Serilerine Göre Sıralanmış Çok Katmanlı Yapıların Akustik Performans Analizleri | 53 |
| 6.2.1.Fibonacci Serileri..... | 53 |
| 6.2.2.Farklı Fibonacci Serisi Dizilimli Eş Katman Kalınlığına Sahip Gözenekli Yapıların Akustik Performans Analizleri | 54 |
| 6.2.3.Farklı Fibonacci Serisi Dizilimli Eş Katman Kalınlığı ve Katman Sayısına Sahip Gözenekli Yapıların Akustik Performans Analizleri..... | 60 |
| 7.SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER..... | 66 |
| KAYNAKLAR..... | 68 |
| EK | 70 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 71 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1. Boylamsal Dalgalar | 5 |
| Şekil 2.2. Enlemsel Dalgalar | 5 |
| Şekil 3.1. Akustik halı malzeme örnekleri | 9 |
| Şekil 3.2. Plastik elyaf tipi Polietilen tereflat (PET) malzeme örneği [26]..... | 10 |
| Şekil 3.3. Alçı levha malzeme örneği..... | 10 |
| Şekil 3.4. Yüzeğe gelen dalga yansır, emilir ve transfer edilir..... | 12 |
| Şekil 3.5. Tek katmanlı yapıda ses dalgasının yayılması. Yüzeğe gelen ses dalgası "i", yansıyan dalga "r", iletilen dalga "t" ile gösterilmiştir [2]..... | 14 |
| Şekil 3.6. Çok katmanlı yapıda ses dalgasının yayılması. Gelen dalga "i" ile, yansıyan dalga "r" ile, iletilen dalga ise "t" ile gösterilmiştir [2] | 23 |
| Şekil 4.1. Transfer Matris Metodu (TMM) algoritması | 33 |
| Şekil 5.1. Literatür çalışmasında kullanılan 1.5mm, 3mm ve 6 mm çelik katı katman için ses transfer kaybı TL (dB) değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [3] | 34 |
| Şekil 5.2. Çelik katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 1.5 mm, 3 mm ve 6 mm çelik katı katman için ses transfer kaybı TL (dB) değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 0^\circ$ | 35 |
| Şekil 5.3. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için gerçel kısım ses yansıma kat sayı değerleri Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2] | 36 |
| Şekil 5.4. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için gerçel kısım ses yansıma katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 0^\circ$ | 36 |
| Şekil 5.5. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için sanal kısım ses yansıma kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2] | 37 |
| Şekil 5.6. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için sanal kısım ses yansıma katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 0^\circ$ | 37 |
| Şekil 5.7. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için gerçel kısım ses yansıma kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2]..... | 37 |
| Şekil 5.8. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için gerçel kısım ses yansıma katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 45^\circ$ | 37 |
| Şekil 5.9. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için sanal kısım ses yansıma kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeğe geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2]..... | 38 |
| Şekil 5.10. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için | |

| | |
|---|----|
| sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ | 38 |
| Şekil 5.11. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için gerçel kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2]..... | 38 |
| Şekil 5.12. . Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ | 38 |
| Şekil 5.13. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için sanal kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2]..... | 39 |
| Şekil 5.14. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ | 39 |
| Şekil 5.15. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2] | 40 |
| Şekil 5.16. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ | 40 |
| Şekil 5.17. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2] | 41 |
| Şekil 5.18. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ | 41 |
| Şekil 5.19. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2] | 41 |
| Şekil 5.20. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ | 41 |
| Şekil 5.21. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2] | 42 |
| Şekil 5.22. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ | 42 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.23. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2] | 42 |
| Şekil 5.24. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ | 42 |
| Şekil 5.25. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2] | 43 |
| Şekil 5.26. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ | 43 |
| Şekil 5.27. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayısı. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2] | 44 |
| Şekil 5.28. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° , ses dalgasının yüzeye geliş açısı ... | 44 |
| Şekil 5.29. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayısı. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2] | 45 |
| Şekil 5.30. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° ses dalgasının yüzeye geliş açısı | 45 |
| Şekil 5.31. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapının gerçel kısım normal yüzey empedansı (ZA). Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2] | 45 |
| Şekil 5.32. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapının gerçel kısım normal yüzey empedansı (ZA) değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° | 45 |
| Şekil 5.33. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapının sanal kısım normal yüzey empedansı (ZA). Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2] | 46 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.34 Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapının sanal kısım normal yüzey empedansı (ZA) değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° | 46 |
| Şekil 6.1. İki katmanlı gözenekli “AB” yapısı. 3.5 mm A katman kalınlığı ve 3.5mm B katman kalınlığı olmak üzere toplam kalınlığı 7 mm olan yapı..... | 48 |
| Şekil 6.2. Çok katmanlı gözenekli “ABABABAB” yapısı. Her bir A katman kalınlığı 0,7 mm ve her bir B katman kalınlığı 0,7 mm olmak üzere toplam kalınlığı 7mm olan 10 katmanlı yapı | 49 |
| Şekil 6.3. İki katmanlı gözenekli “AB” yapısı ile her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde oluşturulan çok katmanlı gözenekli “ABABABAB” yapısı ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması..... | 50 |
| Şekil 6.4. Katmanlı “CDC” yapısı. Her biri 12 mm C katman kalınlığı ve 100 mm D katman kalınlığı olmak üzere toplam kalınlığı 124 mm olan yapı. | 51 |
| Şekil 6.5. Çok katmanlı “CDCCDCCDC” yapısı. Her bir “C katman kalınlığı 4 mm ve her bir D katman kalınlığı 33.33 mm olmak üzere toplam kalınlığı 124mm olan 9 katmanlı yapı | 52 |
| Şekil 6.6. Katı alçıpan-hava “CDC” yapısı ile, her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde oluşturulan çok katmanlı “CDCCDCCDC” yapısı ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması | 53 |
| Şekil 6.7. İki katmanlı gözenekli “EF” yapısı. 90 mm E katman kalınlığı ve 90 mm F katman kalınlığı olmak üzere toplam kalınlığı 180 mm olan iki katmanlı yapı. | 56 |
| Şekil 6.8. Fibonacci Serisi diziliminin 3. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 45 mm ve F katman kalınlığı 90 mm olan üç katmanlı yapı | 56 |
| Şekil 6.9. Fibonacci Serisi diziliminin 4. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 30 mm ve her bir F katman kalınlığı 45 mm olan beş katmanlı yapı. | 57 |
| Şekil 6.10. Fibonacci Serisi diziliminin 5. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 18 mm ve her bir F katman kalınlığı 30 mm olan sekiz katmanlı yapı | 57 |
| Şekil 6.11. Fibonacci Serisi diziliminin 6. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 11,25 mm ve her bir F katman kalınlığı 18 mm olan on üç katmanlı yapı | 58 |

| | |
|---|----|
| Şekil 6.12. Fibonacci Serisi diziliminin 7. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 6,92 mm ve her bir F katman kalınlığı 11.25 mm olan yirmi bir katmanlı yapı | 58 |
| Şekil 6.13. iki katmanlı gözenekli “EF” yapısı ile her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde oluşturulan ve Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapıların ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması | 59 |
| Şekil 6.14. Fibonacci Serisi diziliminin 2. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı | 62 |
| Şekil 6.15. Fibonacci Serisi diziliminin 3. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı | 62 |
| Şekil 6.16. Fibonacci Serisi diziliminin 4. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı | 63 |
| Şekil 6.17. Fibonacci Serisi diziliminin 5. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı | 63 |
| Şekil 6.18. Fibonacci Serisi diziliminin 6. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı | 64 |
| Şekil 6.19. Fibonacci Serisi diziliminin 7. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı | 64 |
| Şekil 6.20. Toplam katman kalınlığı, malzeme özellikleri ve katman sayısı aynı kalacak şekilde oluşturulan, Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapıların ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması..... | 65 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Çizelge 3.1. Çok katmanlı Yapılarda Sınır Koşulları Denklemleri..... | 29 |
| Çizelge 3.2. Çok katmanlı Yapılarda Sınır Koşullarını Sağlayan Arayüz Matrisleri..... | 30 |
| Çizelge 4.1. Sıvı, katı, gözenekli katman yapısına bağlı olarak yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB programına girdi olarak kullanılan malzeme parametreleri | 32 |
| Çizelge 5.1. Literatürde Kullanılan Çelik katı katman malzeme özellikleri | 34 |
| Çizelge 5.2. Literatürde kullanılan cam katı katman malzeme özellikleri | 36 |
| Çizelge 5.3. Literatürde kullanılan alçıpan katmanı ve hava katmanı malzeme özellikleri | 40 |
| Çizelge 5.4. Literatürde kullanılan iki farklı halı gözenekli katman malzeme özellikleri .. | 44 |
| Çizelge 6.1. İki farklı gözenekli akustik halı katmanı malzeme özellikleri | 48 |
| Çizelge 6.2. Katı Alçıpan Katman ve Hava Boşluğu malzeme özellikleri..... | 51 |
| Çizelge 6.3. Fibonacci Serisinin diziliminin farklı kuşaklarına ait katman sayıları ve katman sıralamaları..... | 54 |
| Çizelge 6.4. İki farklı akustik halı malzemesi katman E ve katman F malzeme özellikleri | 55 |
| Çizelge 6.5. Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşakları için E ve F katmanları toplam katman sayısı, katman sıralaması ve katman kalınlıkları | 55 |
| Çizelge 6.6. Akustik halı malzemesi Katman G ve Katman H malzeme özellikleri..... | 60 |
| Çizelge 6.7. Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre 42 katman olarak sıralan G ve H katmanları toplam katman sıralaması ve katman kalınlıkları..... | 61 |
| Çizelge 6.8. Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapıların ses yalıtım performansı sıralaması..... | 65 |

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel ve çevresel gürültü dolayısı ile akustik yalıtım oldukça önemli bir hale gelmiştir. Akustik özelliklerin önemli olduğu konut, otomotiv, beyaz eşya gibi sektörlerin yanında, akustik gizliliğin de önemli olduğu savunma sanayisinde de bu tip akustik yalıtım malzemeleri ve akustik sönüm sistemleri sıklıkla kullanılmaktadır [1-2]. Aynı zamanda akustik konforun sağlanması ve gürültü seviyelerinin rahatsız edici olmaması için belirli düzeye indirilmesi gerekmektedir.

Katı, sıvı ve gözenekli özelliğe sahip çok katmanlı yapılar çeşitli mühendislik uygulamalarında yalıtım amaçlı kullanılmaktadır [3-5]. Kaplamalı panel yapısı üzerinden ses aktarımı problemi literatürde kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu teorik ve deneysel çalışmaların çoğu gözenekli yapıların kullanılmadığı ve ses dalgasının yüzeye dik geldiği iki katmandan oluşan yapılarda değerlendirilmiştir [6]. Bununla birlikte tek bir katman yerine çok katmanlı gözenekli yapıların kullanıldığı malzemeler konut yalıtımında geniş bir frekans aralığında üstün ses yalıtım performansı elde etmek adına değerlendirilmiştir.

Günümüzde gürültüye yönelik yapılan sönüm uygulamalarında üretilen malzemelerin, ses iletim kayıplarının bulunması için bilgisayar destekli programların kullanılması yerine çeşitli testler yapılmaktadır. Bu testleri tekrarlayarak titreşim ve akustik açısından başarılı bir tasarım elde etmek ise zaman, masraf ve iş gücü gerektirmektedir. Fiziksel test yerine bilgisayar destekli bir program ile benzetim yapmak ve bunu tasarım süreciyle bütünleştirerek, gürültüyü en aza indirmek, günümüz koşullarında verimli bir tasarım elde etmek için şarttır. Bu tip programlar ise ancak literatürdeki teorilerin ve akustik modellemede hangi parametrelerin önemli olduğunun bilinmesi ile daha verimli olarak kullanılabilir. Böylece, zaman ve iş gücü açısından daha olumlu sonuçlar elde edilebilir. Bu kapsamda, akustik yalıtım üzerine nümerik sayısal çalışmalara literatürde yer verilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), sınır eleman yöntemi (BEM), istatistiksel analiz ve ışın demetinin izlenmesi gibi benzetim teknikleri kullanılarak, karmaşık mühendislik problemlerinin pratik ve teorik olarak çözümü kolayca sağlanmaktadır. Örneğin, iki katmanlı yapıda transfer kayıplarını analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve sınır eleman yöntemi (BEM) kullanılmıştır [7, 8].

Toplam yapı kütlelerini en aza indirirken aynı zamanda ses iletimi kaybını en üst düzeye çıkararak ses yalıtımını maksimum düzeyde tutmak için birçok sektörde iki katmanlı yapılar kullanılmıştır [6]. Bu gibi çok katmanlı yapıların tasarımında malzeme seçimi,

katman kalınlığı ve bu katmanların sıralanması ses yalıtımını maksimum düzeyde tutulması için kritiktir.

Ses ve yapı etkileşimi, ses yayılımının ayrıntılı modellenmesi, ses üretme ve yayılımının incelenmesi, bu modellerin doğruluklarının hesaplanması, kullanılan modellere bağlı olarak hesaplama sürelerinde büyük farklılıklar göstermektedir. Ses ve yapı etkileşimi gibi akustik incelemeler, girdi parametreleri olarak yüzey karakteristik özellikleri gibi değişebilen varsayımlar üzerinde çalışmaktadır. Bu değişen varsayımların ses yayılımının modelinin uygulanabilirliği üzerinde büyük bir etkisi vardır.

Bu tez çalışmasında, çok katmanlı olarak sıralanan ve özel dizilimlere sahip çok katmanlı yapılar, özellikle sınır koşullarına ve yüzey karakteristik özelliklerine dikkat edilerek Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılarak modellenmiş ve yapıların akustik performansını gösteren ses yapı etkileşimi incelenmiştir. Akustik yalıtım performansı, aynı malzeme ve aynı katman kalınlığı ile oluşturulmuş iki katmanlı yapılar ile çok katmanlı yapılar arasında karşılaştırılmış ve katman sayısının akustik performansa etkisi incelenmiştir. Yapıların özel dizilimlere göre sıralanmasının akustik performansa etkisinin incelenmesi için, aynı malzemelerle eşit kalınlıkta oluşturulmuş iki katmanlı yapı ile Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı yapıların akustik performansları karşılaştırılmıştır. Son olarak özel dizilimlere göre sıralanan yapıların kendi aralarında akustik performansının ortaya konulması için eş kalınlık ve katman sayısına sahip, Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı yapıların ses yapı etkileşimi kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, sıvı, katı ve gözenekli malzemelerin kullanıldığı çok katmanlı yapıların akustik özelliklerinin gözlemlenmesi için, Brouard ve arkadaşlarının geliştirmiş olduğu Transfer Matris Metodu'na benzer bir metot geliştirerek, çok katmanlı yapıların akustik yalıtıma etkisini gözlemlenmiştir [26].

Bölüm 2'de bu konu üzerinde hangi çalışmaların yapıldığını belirlemek amacıyla literatür araştırması yapılmış ve incelenen çalışmalar derlenmiştir. Bölüm 3'te genel olarak temel ses bilgileri ve ses yayılım teorisi üzerinde durularak, katı, sıvı ve gözenekli yapıda endüstride kullanılan temel akustik malzemeler belirtilmiştir. Katı, sıvı ve gözenekli malzemelerden oluşan tek katmanlı ve çok katmanlı yapılarda sesin yayılması, dalga denklemleri, transfer matrisinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Çok katmanlı yapılarda transfer matris metodu için girdi oluşturacak olan, bir katmandan diğer katmana geçişte sınır koşul denklemleri ve arayüz matrisleri belirtilmiştir. Tek katman için formüle edilmiş

transfer matrisi, çok katmanlı yapıya uyarlanmış ve yapının akustik performansının değerlendirilmesinde kullanılan yansıma katsayısı, transfer katsayısı ve transfer kaybının nasıl formüle edildiği gösterilmiştir. Bölüm 4'te tez çalışması süresince kullanılacak olan transfer matris modelleme programı için girdi olan katı, sıvı, gözenekli malzemelerin özellikleri belirtilmiştir. Bununla birlikte transfer matris metodunun algoritması açıklanmıştır.

Bölüm 5'te, literatürde kullanılan malzeme özellikleri ve yapılar girdi olarak kullanılarak MATLAB programı ile yazılan Transfer Matris Metodu (TMM) derlenmiştir. Sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak ve Transfer Matris Metodu (TMM) için yazılan yazılımın doğruluğu gösterilmiştir. Bölüm 6'da, periyodik ve özel dizilimlere sahip çok katmanlı yeni yapıların modellenmesi, ses yapı etkileşimi ve transfer kayıpları anlatılmaktadır. Son bölümde ise, proje sonuçları ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır. Gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ses yalıtımı sağlanmak için çeşitli amaçlarla kullanılan malzemelerin akustik performanslarının belirlenmesi ve gürültüye yönelik yapılan sönüm uygulamalarında kullanılan katı, sıvı, gözenekli malzemeler ve akustik yalıtım elemanları hakkında uzun yıllar boyunca çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Gözenekli malzemeler için ilk olarak Beranek 1947'de yaptığı çalışmada elastik ve gözenekli tabakaların akustik özelliklerini belirlemede katı-gözenekli modellerin kullanılamayacağını belirtmiştir [9]. Bu çalışmada Zwicker ve Kosten'nın 1949'da yaptıkları modellemeyi temel olarak almışlardır [10]. Böylece, katı ve akışkan katmanlar arasındaki etkileşimi belirleyerek, gözenekli malzemenin esneklik etkisinin frekansa bağlı olduğunu ve gözenekli malzemelerde düşük frekanslarda esneklik etkisinin ihmal edilemeyeceğini, yüksek frekanslarda ise ihmal edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.

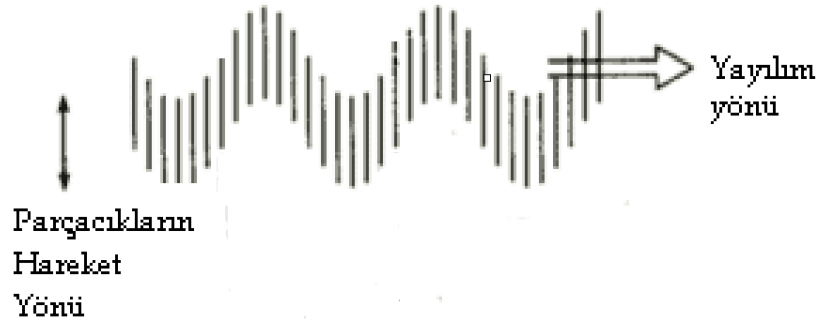
Ses yayılım teorisi gözenekli malzemeler için Biot tarafından 1956 yılında, daha çok deprem bilimi (sismoloji) amaçlı olarak geliştirilmiştir. Daha sonra Biot'un teorisi gözenekli malzemelerin akustik özelliklerinin tahmini için akustik çalışmalara adapte edilmiştir. Biot'un akustikte uyguladığı çalışmaların önemi, elastik gözenekli ortamda dalgalar için türetilmiş dalga hareket denklemlerinin uygulanmasıdır [11].

Cam elyaf, köpükler, halı ve polietilen gibi elastik gözenekli materyallerin katmanları, sıvı ve katı olmak üzere iki fazlı bir malzeme olarak kabul edilir. Gözenekli malzemelerde sesin ilerleyişi üzerine birçok çalışma yapılmıştır ve birçok model geliştirilmiştir. Bunlardan biri 1970 yılında, Delaney ve Bazley'in elastik malzeme olan cam elyafın karakteristik empedansını ve ilerleme sabitini ölçerek yaptığı, ölçümler sonucunda yarı deneysel bir model geliştirdiği çalışmasıdır [12]. Elde ettikleri sonuçlar ve modelleme, yaygın bir biçimde kullanılıyor olsa da geliştirdikleri formüller sadece yüksek gözenekli ve lifli yapıya sahip malzemelere uygulanabilir.

Katı malzemelerin akustik etüdü, sıvı ortama göre daha karmaşıktır. Bunun nedeni sıvı katmanlar için ses dalgalarının boylamsal dalgalar (compressional wave) biçiminde oluşurken, katı malzemelerde akustik yayılımın enlemsel (shear wave) ve boylamsal (compressional wave) dalgalar biçiminde olmasıdır. Enlemsel dalgalar dikey olarak ortamı titreştirerek yayılırlarken, boylamsal dalgalar yatay olarak ortamı titreştirerek yayılırlar. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de boylamsal ve enlemsel dalgaların ortam parçacıklarının hareket yönü gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Boylamsal Dalgalar



Şekil 2.2. Enlemsel Dalgalar

Folds ve Loggins, 1977 yılında tek katmanlı katı malzeme ile sesin yayılımını bir transfer matrisi kullanılarak tarif etmiştir [13]. Transfer matrisi yüzeye gelen ses dalgasının normal ve teğet hızları ile sesin her katman yüzeyinde oluşturduğu normal basınç ve kayma basıncı ile hesaplanmıştır. Yansıma katsayısı ise yüzeye gelen dalganın oluşturduğu normal basınç ve parçacık hızından hesaplanan, normal yüzey empedansı kullanarak elde edilmiştir. Çok katmanlı katı malzemelerin akustik etüdü, her bir katman için hesaplanan transfer matrislerinin çarpımından elde edilen tüm sistem transfer matrisi ile hesaplanmıştır.

Attenborough tarafından 1983'de gözenekli malzemeler için daha kararlı bir model geliştirmiştir ve bu model, dış mekân ses yayılımı uygulamalarında kullanılmıştır [14]. Attenborough çalışmasında, gözenekli malzemeleri çepeçevre saran basınç altındaki sıkışmasının bir ölçüsü olan hacimsel modülünü ve yüzey empedansını tahmin etmek için, gözenekli katmanı eşdeğer bir sıvı katman olarak modellemiştir. Çalışmasında, bu eşdeğer sıvı katmanın elastik etkilerini içermeyecek şekilde modelleme yapmıştır. Attenborough'un modelinin daha da geliştirilmesi, 1987'de Johnson tarafından, yüzey eğriliği (tortuosity) kavramının ele alınmasıyla olmuştur [15]. Yüzey eğriliği (tortuosity), gözeneklerin oluşturduğu kanalların malzeme içinde ne kadar kıvrımlı bir yol izlediğini tanımlayan özellik olup, malzeme içindeki birbirine bağlı gözeneklerin oluşturduğu ses yayılım kanalları uzunluğunun, malzemenin kalınlığına oranlanmasıyla bulunur. Malzemedeki ses

yayımlı kanal, malzeme kalınlığına eşit olduğu durumda yüzey eğriliği “1”e eşittir. Yüzey eğriliği arttıkça, bu değer 1’in üzerine çıkmaktadır. Taneli yapıdaki gözenekli pek çok malzeme için bu değer “1” in üzerindedir.

Günümüzde, akustik performans ile ilgili kullanılan özel malzemeler, ölçüm ve tahmin metotları üzerine çalışılmaktadır. 1989 yılında, çok katmanlı düzlemsel yapıların transfer matrisi yöntemiyle akustik modellenmesi üzerinde Mueller vd. tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu eser sayesinde, transfer matris yöntemi temel alan bariyer, gözenekli ortam, sürekli ortam modellerini kullanarak, 5 katmana kadar sıralanmış ve yapıların akustik performanslarının tahmin edilmesi için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir [16].

Allard vd., transfer matrislerini kullanarak çok katmanlı ses yalıtım malzemelerinin dik yüzey empedansı için modeller türetmiş ve sonrasında yüzeye eğik gelen ses dalgası için de çeşitli modeller üzerine çalışmıştır [17, 18]. Daha sonra Allard, Biot teorisini transfer matris metodu ile uygulayarak elastik gözenekli malzeme modelini geliştirmiştir [19]. Transfer matrisi modeli yalnızca kalınlığı sınırlı ve sonsuz boyutta olan katmanlar için geçerlidir. Bununla birlikte, transfer matrisleri, malzemelerin akustik özelliklerini değerlendirmek için etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır ve bu araştırmada kullanılmıştır.

Song vd. 1999’da transfer matris yaklaşımı ile gürültü kontrol malzemelerinin temel akustik özelliklerinin tahmin edilmesi üzerine çalışmıştır [20]. Song vd. bu makalelerinde, gözenekli malzemelerin akustik özelliklerini geliştirmek amacıyla yeni bir metot tanımlamışlardır.

2000 yılında Kinsler ve arkadaşları, homojen olarak sıralanmış sıvı katmanlarda sesin ilerleyişi üzerine çalışmışlardır [21]. Kalınlığı sınırlı ve sonsuz boyutlu tek katmanlı sıvı tabaka ve çok katmanlı sıvı tabakalar ile sesin yayılımı üzerine yapmış olduğu çalışmada, ses dalgasının yüzeyde oluşturduğu basınç, yansıma katsayısı, iletim katsayısı, emilim katsayısı ve normal yüzey empedansı gibi akustik özellikler tanımlamış ve formüleştirelmıştır.

Hodgson ve Wareing’in 2001’de yayınladıkları makalede, Biot teorisini transfer matris metodu ile adapte ederek gözenekli yapıların akustik özelliklerini analiz etmişlerdir [22]. Bununla birlikte transfer matris metodunu, demet tarama algoritması ile birleştirerek farklı geometrik özelliklere sahip odalar için akustik performanslarını incelenmişlerdir. Demet tarama algoritması ve transfer matris metodu, geometrik özellikleri 3-3-3 m³ olan bir ofis, 10-3-3 m³ olan bir koridor ve 10-10-3 m³ bir çalışma odası için gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, transfer matris metodu ve demet tarama algoritması adaptasyonu ile modellenen programın gerçeği ne kadar iyi yansıtıp yansıtmadığı ölçümler ile belirlenmiştir.

2008 yılında Khurana vd.'nin yayınladığı makalede malzemelerin yüzey empedansı, frekans ve ses dalgasının geliş açısının bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür [23]. İçyapı dağılımı olarak homojen dağılım gösteren ve homojen dağılım göstermeyen malzemelerin, transfer matris metodu ile akustik özellikleri karşılaştırılmış ve homojen dağılımın akustik yalıtım performansında önemli derecede etkili olduğu belirlenmiştir.

2010 yılında Abid vd.'nin yaptığı çalışmada transfer matris metodu kullanılmış ve katman kalınlığının gözenekli yapılarda akustik yalıtıma etkisi incelemiştir [3]. Katman kalınlığına göre transfer kayıpları incelenmiş ve katman kalınlığı fazlaştıkça transfer kayıplarının arttığını, dolayısı ile akustik yalıtımın iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Yine aynı çalışmada iki katmanlı çelik tabaka arasına gözenekli yapı konularak üç katmanlı yapı elde edilmiş ve aynı ağırlıkta tek katmanlı çelik tabaka ile akustik yalıtım özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada çelik katman-gözenekli katman-çelik katman olarak sıralanmış üç katmanlı yapının daha iyi akustik yalıtım sağladığı gözlemlenmiştir. Yine aynı çalışmada üç katmanlı (2mm çelik katman-5mm gözenekli katman-2mm çelik katman) olarak sıralanan yapı ve aynı ağırlıkta, aynı malzemeler ile iki katmanlı olarak sıralanmış yapı (4mm çelik katman-5mm gözenekli katman) karşılaştırılmış ve hangi yapının daha iyi ses yalıtım sağladığı analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada üç katmanlı yapının daha iyi akustik yalıtım sağladığı gözlemlenmiştir. Transfer matris metodu ile hesaplanan sonuçlar ölçümlerle karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Liu, 2014 yılında yayınladığı çalışmada aynı ağırlıkta gözenekli malzemelerle iki katmanlı ve üç katmanlı yapılar tasarlamış ve tasarladığı bu yapıların iletim kayıplarını hesaplayarak hangi yapının daha iyi yalıtım sağladığını transfer matris metodu ile araştırmıştır [24]. Araştırma sonucunda, gözenekli üç katmanlı yapı, iki katmanlı yapıya göre daha üstün akustik performans göstermiştir. Üç katmanlı yapıda, aralarında hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş olan yapıların, tüm frekans aralığında en iyi akustik performans sağladığı sonucuna varılmıştır.

Görüldüğü gibi, birçok malzeme modeli, üretim şekli, malzeme özelliklerinin akustik performansa etkisi, test metodları ve sonlu elemanlar metodu üzerinde ayrıntılı araştırmalar yapılırsa da, yapılan çalışmalarda katmanların sıralanmasında özel bir dizilim kullanılmamış

ve özel bir dizilimin akustik yalıtıma etkisi araştırılmamıştır. Bu çalışmada, katmanlı olarak dizilen malzemelerin akustik performansa etkisi tekrar vurgulanmış, bunun yanı sıra Fibonacci Serisi özel dizilimine göre sıralanmış yapıların ses yalıtımına etkisi araştırılmış ve rastgele olarak sıralanmış yapılara göre akustik performansı karşılaştırılmıştır. Ayrıca Fibonacci Serisi özel diziliminin farklı kuşaklarına göre sıralanmış yapıların akustik performansları kendi aralarında karşılaştırılarak hangi kuşak Fibonacci Serisi diziliminin daha iyi akustik yalıtım gösterdiği araştırılmış, transfer kayıpları gösterilmiştir.

3. SES YAYILIM TEORİSİ

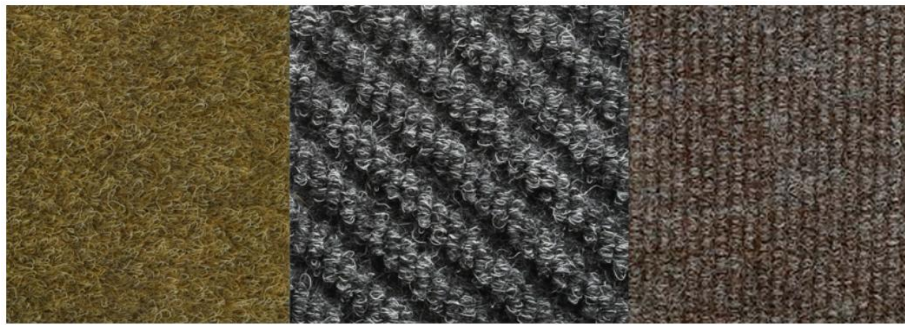
Ses yalıtımı ve ses iletim kaybını arttıran uygulama ve tasarımları anlamak için öncelikle sesin nasıl yayıldığı konusundaki temel bilgilerin ve matematiğin gözden geçirilmesi gerekir. Bu sebeple, bu bölümde temel ses tanımları, sesin belirli ortamlar içerisindeki ilerleyişi, ses yutulumu ve ses iletim kaybı ile ilgili bilgi verilecektir.

3.1. Temel Ses Bilgileri ve Temel Akustik Malzemeler

Ses, dalgalar halinde yayılan bir enerji şeklidir ve kulak tarafından algılanabilen hava, su ya da benzeri bir ortamdaki basınç değişimi olarak tanımlanır. Ses nesnel bir kavramdır ve varlığı kişiden kişiye değişmez. Gürültü ise öznel bir kavram olup, hoş gitmeyen, istenmeyen, rahatsız edici ses olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde, ses yalıtımının sağlanmasında endüstride kullanılan akustik malzemelere yer verilecektir. Buna ek olarak ses ölçümlerinde kullanılan temel parametreler açıklanacak ve ses iletim kaybının tanımları yapılacaktır.

3.1.1. Endüstride Kullanılan Temel Akustik Malzemeler

Ses yalıtımının sağlanmasında kullanılan malzeme çeşitleri istenen akustik konforun sağlanması için çok önemlidir. Sektörde sıkça rastlanan malzeme tipleri, cam elyaf ve türevleri, mikro fiber yapılar, çok katmanlı gözenekli yapıya sahip kompozelerdir. Sıklıkla rastlanan bu malzemeler arasında, tiftik halindeki pamuk ya da halı görülebilir. Akustik halı çeşitleri ses yutum özelliği ile gürültülü ortamlarda zemine döşenerek ses yalıtımını sağlayan alternatif seçenekler arasında yer almakta ve Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Akustik halı malzeme örnekleri

Polyester ve polipropilen, yutum elemanı olarak kullanılan gözenekli plastik malzemeler içerisinde yer almaktadır. Zent vd.’nin otomotiv sektöründe kullanılan malzemelerin akustik performansa etkisini incelediği araştırmasında test edilen malzemelerin çoğu plastik elyaf tipi polietilen tereflattır (PET) [26]. Polietilen tereflat (PET) malzeme örneği de Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Plastik elyaf tipi Polietilen tereflat (PET) malzeme örneği [26]

Konut yalıtımı için alçı levha (drywall) kullanılır. İki kalın kâğıt tabakası arasında sıkıştırılmış alçı plasterden yapılmış, katı malzeme yapısında bir paneldir. Konut yalıtımında iç duvar ve tavan yalıtımı için bir kaplama olarak kullanılır. Waring'in oda ses yalıtımı ile ilgili araştırmasında malzeme olarak etkisi incelenen bir malzemedir ve Şekil 3.3'de gösterilmektedir [2].



Şekil 3.3. Alçı levha malzeme örneği

İki panel arasına hava boşluğu bırakılarak oluşturulan sistemlerde hava, sıvı katman özelliğine sahiptir. Liu araştırmasında gözenekli yapıya sahip yapılar arasında hava boşluğu katmanı olacak şekilde farklı dizilimler ile sıralanmış ve bu katmanların ses yalıtım özelliklerini karşılaştırmıştır [24].

3.1.2. Ses Ölçümlerinde Kullanılan Temel Parametreler

Sesin tanımlanmasında ve ses ölçümlerinde, temel olarak üç parametre rol almaktadır. Bunlar, ses basıncı, ses gücü ve ses şiddetidir.

Akustik analizin temeli, ses dalgasının üretilmesi ve ses dalgası yayılımının belirli bir alan içerisinde incelenmesidir. Bir akışkanda, ses enerjisi bir kaynaktan yayılır ve dalgalı basınç halinde boyamsal dalga şeklinde dağılır. Ses enerjisi, ses basıncının karesi ile orantılıdır ve alıcı tarafında algılanır. Ses dalgasının bir alanda yayılması p ses basıncı, c dalga hızı

ve t zaman olmak üzere Eşitlik 3.1’de dalga denklemi ile doğrusal biçimde ifade edilir.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

Akustik incelemelerde durağan hava standart sıcaklık ve basınç altında ($20^\circ C$ ve $101.3 kPa$) sıvı olarak kabul edilir. Bununla birlikte ses, dalga olarak yayıldığı için frekansa bağlıdır. Bu sebeple ses dalgaları, hızlı fourier dönüşümü (FFT) gibi sinyal işleme operasyonları kullanılarak frekans alanında analiz edilebilir. İnsan kulağı $20-20000 Hz$ frekans aralığında olan seslere duyarlıdır. Bu nedenle akustik incelemelerde tek bir frekans yerine frekans bant aralığında çalışılmaktadır.

Helmholtz denklemleri kullanılarak, akustik basıncın belirli frekanstaki tepkisi zamana bağlı formda $-e^{j\omega t}$ dalga denklemleri olarak Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3’te düzenlenebilir.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3.2)$$

$$k = \frac{\omega}{c}, \omega = 2\pi f \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.2 ve 3.3’te , p ses basıncını (Pa), k dalga sayısını (m^{-1}), c dalga hızını (m/s), f frekans (Hz) ve ω açısal hızı (rad/s) ifade etmektedir.

Ses enerji denklemi akustik problemin analizinde önemli rol oynamaktadır. Bir kaynaktan yayılan ses dalgası alıcı tarafında basınç dalgalanmaları olarak algılanır. Ses enerji seviyesi akustik basıncın p karesiyle orantılıdır ve ses basınç seviyesi olarak L_p desibel cinsinden ifade edilir.

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right), p_{ref} = 20mPa \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4’te belirtilen L_p ses basınç seviyesini (dB), p ses basıncını (Pa), p_{ref} referans basınç seviyesini (Pa) ifade etmektedir [2].

Bir kaynaktan yayılan sesin başlangıç enerjisi o kaynağın gücüne ve ses gücüne bağlıdır. Ses gücü watt cinsinden (W), ses güç seviyesi L_w ise desibel olarak ifade edilir.

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right), W_{ref} = 10^{-12}W \quad (3.5)$$

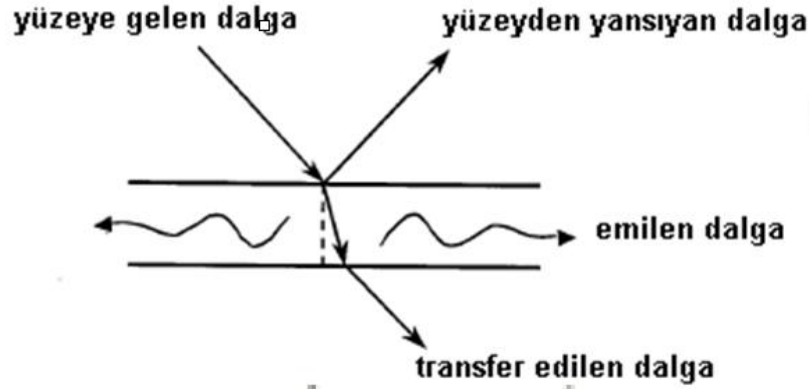
Eşitlik 3.5’te, L_w ses güç seviyesini (dB), W ses gücünü (W), W_{ref} referans ses gücünü (W) ifade etmektedir [2].

Kaynaktan yayılan ses dalgası farklı ortamlarda birden fazla yolla alıcıya ulaşır ve bu yollarda engeller ile karşılaşabilir. Ses dalgasının alıcıya ulaşacağı en basit yol tek doğrultuda ve engelsiz ortamda kaynaktan alıcıya ulaşmasıdır. Bu durumda toplam enerji

tek bir yol ile alıcıya ulaşır. Bu araştırmanın odağı iç engelleri olmayan ve çok katmanlı olarak modellenmiş yapıların kaynaktan alıcıya ulaşması sırasında ses dalgasının emilim, yansımaya ve iletim karakteristiğinin incelenmesidir.

Kaynak-alıcı yolunun doğru modellenmesi için ses enerji seviyesinin ve dalganın yüzey üzerinde emilim, yansımaya ve iletim karakteristiğinin incelenmesi gereklidir. Herhangi bir kaynaktan çıkan ses dalgasının enerjisi, çarptığı yüzeyden yansıtılarak, çarptığı yüzeyde bir kısmı emilerek ve bir kısımda yüzeyden transfer edilerek bölünür. Bir yüzeydeki ses enerjisi dağılımı, **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te, ses yayılım yollarını gösteren ışınlarla gösterilmiştir. Bu enerji dağılımı, p enerji yansımaya katsayısı, a enerji emilme katsayısı ve τ enerji transfer katsayısı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$p + a + \tau = 1, 0 \leq p \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq \tau \leq 1 \quad (3.6)$$



Şekil 3.4. Yüzeye gelen dalga yansır, emilir ve transfer edilir

Bir yüzeye gelen ses dalgası kaynaklı yansıyan ve transfer edilen dalga açısı ve basınç değişimi ile yansıtılır ve transfer edilir. Bu açı ve basınç değişimleri yüzey sınır denklemleri ile R ses yansımaya katsayısı ve T ses transfer katsayısı olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$R = \frac{P_r}{P_i}, T = \frac{P_t}{P_i} \quad 0 \leq R \leq 1 \text{ ve } 0 \leq T \leq 1 \quad (3.7)$$

$$T = \frac{P_i + P_r}{P_i} = 1 + R \quad (3.8)$$

$$P_t = P_i + P_r \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.7, Eşitlik 3.8 ve Eşitlik 3.9'da, P_r yüzeyden yansıyan ses dalgası basıncını (P_r), P_i yüzeye gelen ses dalgası basıncını (P_i) ve P_t yüzeyden transfer edilen ses dalgası basıncını (P_t) ifade etmektedir.

Ses transfer kaybı, bir malzemenin, ses yalıtma kapasitesini desibel (dB) cinsinden veren bir özelliğidir. Ses transfer kaybı (TL) Eşitlik 3.10 ile tanımlanır:

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad (dB) \quad (3.10)$$

Burada, W_1 malzemenin üzerine gelen toplam ses enerjisi, W_2 ise transfer edilen ses enerjisidir. Ses transfer kaybı, ses transfer katsayısı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$TL = -20 \log(T) \quad (dB) \quad (3.11)$$

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

Ses dalgasını modellemek için yüzey sınır şartı olarak normal yüzey empedansını belirlemek gereklidir. Akustik olarak empedans ses basıncının, parçacık ses dalgası hızına oranıdır. Bir düzlem boyunca ilerleyen düzlem dalgalar için karakteristik empedans sabit olup $Z_c = \rho_0 \cdot c$ olarak ifade edilir. ρ_0 yoğunluk ve c dalga hızı olmak üzere hava ortamında standart sıcaklık ve basınç ortamında havanın karakteristik empedans değeri $Z_c = 415 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ olarak belirlenmiştir.

3.2.Ses İletim Teorisine Giriş

Gürültü kontrolü ve uygulamalarına geçmeden önce ses dalgasının bir ortam içerisinde ilerleme davranışının incelenmesi önemlidir. Bunun için ses dalgalarının sağlaması gereken dalga denklemleri ile başlanabilir. Bu bölümde, ileride simülasyonları yapılacak olan ses iletim kaybı ve ses yutumu parametrelerine bir temel oluşturması açısından ses dalga denklemleri üzerinde durulacak ve yapıların akustik özelliklerini tahmin etmede kullanılan Transfer Matrisinin Metodunun (TMM) formülleri açıklanacaktır.

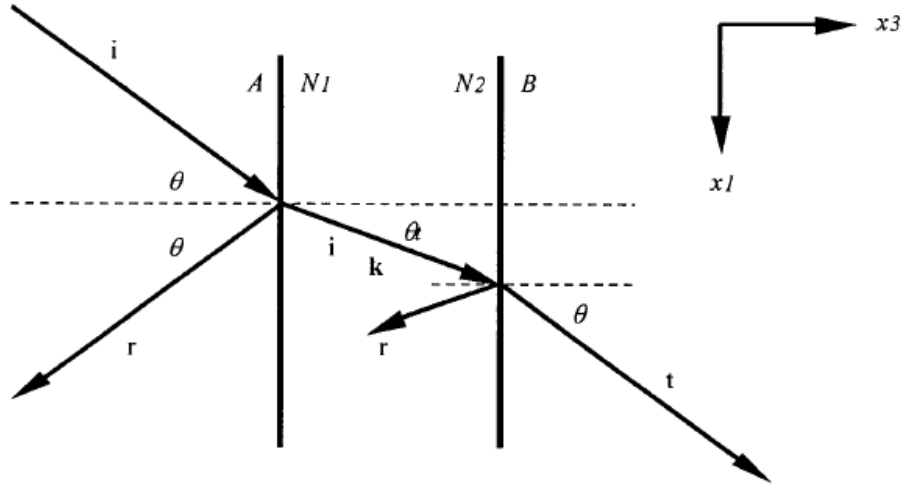
3.2.1. Katmanlı Ortamda Sesin Yayılımı ve Dalga Denklemleri

Bir yapıda yansıma katsayısının, transfer katsayısının ve transfer kaybının belirlenmesi için, transfer matris modeli uygulanarak bu yüzeyin yüzey empedansının ve yüzey basınç yansıma katsayısının hesaplanması gerekir. Transfer matris modeli uygulanacak olan katı, sıvı veya gözenekli bir katmanda, katman kalınlığını (normal yüzeyi boyunca) sınırlı, diğer yönlerde ise sonsuz olarak analiz eder.

Yüzeye gelen dalganın yansıma katsayısını hesaplamada, yüzeyin normal yüzey empedansı ve bu yüzey sınırının dışındaki akustik basınç bilinmelidir. Normal yüzey empedansı, gelen dalga tarafındaki ses dalgası parçacığının hızının normal bileşeninden elde edilir.

Şekil 3.5'te tek katmanlı bir yapıya gelen ses dalgasının yayılımı gösterilmiştir. Yüzey ile θ° açısı yaparak katmanın A dış yüzeyine gelen ses dalgası, θ° açısıyla aynasal olarak yansır. Eğer çarptığı yüzeyin yansıma katsayısı birden küçükse (katman dış ortamdan daha

yoğun ise), ses dalgası katman içerisinde θ° açılarından daha küçük bir açı ile diğer ortama transfer edilir. Transfer edilen dalganın bir diğer aynasal yansıması katmanın B iç yüzeyinde gerçekleşir. Katman B nin iç yüzeyine gelen dalga tekrar yansıyarak A katmanının iç yüzeyine doğru yayılır. Bir katmandan transfer edilen ve yansıyan her dalga için, parçacık hızının normal bileşeni v_3 ve parçacığın yüzeyde oluşturduğu basınç p , her sınırdaki bağımsız niceliklerdir ve yüzey empedansının hesaplanmasında kullanılır.



Şekil 3.5. Tek katmanlı yapıda ses dalgasının yayılması. Yüzeğe gelen ses dalgası "i", yansıyan dalga "r", iletilen dalga "t" ile gösterilmiştir [2].

A katmanının yüzey empedansı Z_A , A dış yüzeyine gelen ses dalgası hızının normal bileşeni v_3 ve bu parçacığın yüzeyde oluşturduğu basınç p kullanılarak Eşitlik 3.12'deki gibi hesaplanır:

$$Z_A = \frac{p(A)}{v_3(A)} \quad (3.12)$$

Ses dalgası hızının normal bileşeni v_3 ve yüzey de oluşturduğu basınç p , Şekil 3.5'de $N1$ ve $N2$ olarak gösterilen sınır değerlerindeki özellikler kullanılarak belirlenir. Katmanın A yüzeyindeki özellikleri, sınır koşulları ile $N1$ yüzeyindeki özelliklere bağlıdır. $N2 - B$ sınırında ise; B yüzeyindeki normal yüzey empedans $Z_B = Z_C / \cos(\theta)$ ile ses dalgasının yüzeye normal açı ile geldiği durumda havanın karakteristik empedansına eşittir. Bu nedenle, $N2$ sınırındaki özellikler, B yüzeyinden, A yüzeyindeki özellikler ise $N1$ sınırından çıkarılmaktadır.

$N1$ ve $N2$ sınırlarındaki özellikler, ses dalgası hızının normal bileşeni v_3 ve yüzey de oluşturduğu basınç p bileşenlerini içeren V vektörü ile belirtilir. $N1$ ve $N2$ sınırlarındaki V vektörleri arasındaki ilişki bir transfer matrisi ile ifade edilir [28]. Gelen ve yansıyan dalga katmana yayıldığında, bu transfer matris fonksiyonu katmandaki ses alanının

tanımlanmasında kullanılır. N_1 ve N_2 sınırlarındaki V vektörleri arasındaki ilişki ve transfer matrisi Eşitlik 3.13'te gösterilmiştir.

$$V(N_1) = \mathbf{T} \cdot V(N_2) \quad (3.13)$$

Katmana uygulanan kuvvetler nedeniyle meydana gelen yer değiştirme vektörü \mathbf{u} , skalar ve vektörel potansiyeller olarak φ ve $\Psi = (\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3)$ Eşitlik 3.14'te tanımlanmıştır.

$$\mathbf{u} = \nabla\varphi + \nabla \times \Psi \text{ ve } \mathbf{u} = \mathbf{grad} \varphi + \mathbf{curl} \Psi \quad (3.14)$$

Yer değiştirme vektörü \mathbf{u} Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de açıklanan enlemsel ve boylamsal dalgaların sonucu olarak açıklanır. Boylamsal dalgalar sonucu oluşan yer değiştirme gradyant operasyonu ($\mathbf{grad} \varphi$) ile tanımlanır, enlemsel dalgalar sonucu oluşan yer değiştirmeler ise vektör rotasyoneli ($\mathbf{curl} \Psi$) ile tanımlanır.

Şekil 3.5'de de gösterildiği gibi, yer değiştirme x_1x_3 düzleminde gerçekleşir. Transfer edilen dalga için yayılma yönü pozitif x_1 ve x_3 eksenlerinde, katmandan yansıyan dalga içinse yayılma yönü pozitif x_1 ve negatif x_3 ekseni yönündedir. Düzlem x_1x_3 de yer değiştirme vektörü potansiyelinin (Ψ) sıfır olmayan tek bileşeni Ψ_2 dir. Eşitlik 3.15'te gösterilen φ ve Ψ skalar ve vektörel potansiyel denklemleri Allard'ın çalışmasından alınmış ve bu çalışmada kullanılmıştır [19].

$$\begin{aligned} \Psi_2 &= C e^{j(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} + D e^{j(\omega t - k_1 x_1 + k_3 x_3)} \\ \varphi &= A e^{j(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} + B e^{j(\omega t - k_1 x_1 + k_3 x_3)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15'te skalar ve vektörel potansiyel denklemlerini açıklamada kullanılan k_3 yüzeye gelen dalga sayısı vektörünün katman yüzey normali yönündeki bileşenidir.

Yüzeye gelen dalga sayısı vektörünün katman yüzeyine teğet olan bileşeni k_1 olarak Eşitlik 3.16'da tanımlanmıştır. Eşitlik 3.16'da kullanılan, yüzeye gelen ses dalgası sayısı vektörü \mathbf{k} ve ses dalgasının yüzeye geliş açısı θ 'dir.

$$k_1 = |\mathbf{k}| \cdot \sin(\theta) \quad (3.16)$$

Bir malzemenin gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkisi o malzemenin gerilme-deformasyon eğrisi olarak adlandırılır. Her doğrultuda gözeneklilik özellikleri aynı olan malzemeler için gerilme tensörü bileşenleri σ_{ij} ve şekil değiştirme tensörü bileşenleri e_{ij} arasındaki ilişki Eşitlik 3.17'de ifade edilmiştir.

$$\sigma_{ij} = \lambda(e_{11} + e_{22} + e_{33})\delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (3.17)$$

Bir kütleye uygulanan basınç altındaki sıkışmasının ölçüsü olan hacimsel modülü K (Pa), λ ve μ , lame katsayıları kullanılarak açıklanır. Hacimsel modülü ve lame katsayıları (λ, μ) formülleri Eşitlik 3.18'de gösterilmiştir:

$$K = \lambda + \frac{2\mu}{3}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.18'de yer alan Poisson oranı ν normal gerilmelerin etkisi altında malzemede oluşan çapsal (enine) birim deformasyonların, boyuna birim deformasyonlara oranıdır. Elastisite modülü olarak tanımlanan Young modülü E ise (GPa), malzemenin belirli kuvvet altında şekil değiştirmesinin ölçüsüdür.

Şekil değiştirme tensörü bileşenleri e_{ij} , yer değiştirme vektörü \mathbf{u} bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.19)$$

Gerilme denklemi yer değiştirme vektörü \mathbf{u} bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + B_i \quad i = 1,2,3 \quad (3.20)$$

3.2.1.1.Sıvı Katmanda Ses Dalga Denklemleri

Akışkan katmanlar durağan akışkanlardan oluşur ve sıvı katmanda sadece boylamsal dalga yayılımından söz edilebilir. Sıvı katmanda enlemsel dalga yayılımı olmadığı için Eşitlik 3.14'te belirtilen enlemsel dalgalar sonucu oluşan yer değiştirmeler vektör rotasyoneli ($\mathbf{curl} \Psi$) $\nabla \times \Psi = 0$ olarak yazılır. Boylamsal dalgalar sonucu oluşan yer değiştirme gradyant operasyonu ($\mathbf{grad} \varphi$) ise $\mathbf{u} = \nabla \varphi$ olmalıdır. Sıvı katman için hesaplanan $\mathbf{u} = \nabla \varphi$ denklemi Eşitlik 3.20'de yerine konulursa, sıvı katmanlar için dalga denklemi skalar potansiyel φ cinsinden elde edilir.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad K = \lambda + \frac{2\mu}{3} \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21'in çözümü, bir sıvı katmanda meydana gelen bir boylamsal dalganın skalar potansiyelidir. Şekil 3.5'te belirtildiği gibi, katmanda iki boylamsal dalga bulunmaktadır. Bunlardan biri A sınırına gelen ses dalgası, diğeri ise B sınırından yansıyan ses dalgasıdır. Bu nedenle, sıvı katmandaki ses alanını belirtmek ve bu ses alanını bir transfer matris ile ilişkilendirmek için her iki sınırdaki hız ve basıncın normal bileşenleri kullanılmalıdır. Sıvı katmanda N_1 ve N_2 sınırları arasındaki ilişki Eşitlik 3.22' deki gibi yazılır.

$$\begin{Bmatrix} p(N_1) \\ v_3(N_1) \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_f \begin{Bmatrix} p(N_2) \\ v_3(N_2) \end{Bmatrix} \quad (3.22)$$

Ses dalgası hızının normal bileşenlerini v_3 ve yüzeyde oluşturduğu basınç bileşenlerini p içeren V vektörü ile Eşitlik 3.22'deki gibi ifade edilir. Aralarındaki ilişki bir transfer matrisi \mathbf{T}_f ile ilişkilendirilir. Eşitlik 3.23'te yüzeye gelen dalga sayısı vektörünün, katman yüzey normali yönündeki bileşen k_3 , kaynaktan alıcıya kadar olan mesafe ise L , sıvı ortam yoğunluğu ise ρ ile ifade edilir.

$$\mathbf{T}_f = \begin{bmatrix} \cos(k_3L) & \frac{\omega\rho}{k_3} \sin(k_3L) \\ \frac{k_3}{\omega\rho} j \sin(k_3L) & \cos(k_3L) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Akustik incelemelerde durağan hava standart sıcaklık ve basınç altında (20°C ve 101.3kPa) sıvı olarak kabul edilir.

3.2.1.2. Katı Katmanda Ses Dalga Denklemleri

Katı katmanda Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de açıklanan enlemsel dalgaların ve boylamsal dalgaların yayılımından söz edilir. Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.20'de yerine konulursa katılarda yayılan boylamsal dalgalar için yazılan dalga denklemleri Eşitlik 3.24'teki gibi yazılır.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\rho}{\lambda+2\mu} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (3.24)$$

Eşitlik 3.25 ise enlemsel dalgalar için yazılan dalga denklemleridir.

$$\nabla^2 \Psi = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (3.25)$$

Şekil 3.5'e göre, katı katmanda dört farklı dalga bulunmaktadır. Bu dört farklı dalga, boylamsal dalgalar ve enlemsel dalgalar olarak iki adet katı katman yüzeyine gelen dalgalar ve iki adet bu dalgalardan yansıyan dalgalardır. Katman sınırlarındaki dört nicelik sırası ile normal ve teğet hız bileşenleri v_3 ve v_1 ile normal ve enlemsel gerilme tensörü bileşenleri σ_{33} ve σ_{11} den oluşmaktadır. Katı katman transfer matrisi \mathbf{T}_s ile belirtilen dört bilinmeyenli denklemler sistemi Eşitlik 3.26'da verildiği şekildedir:

$$\begin{Bmatrix} v_1(N_1) \\ v_3(N_1) \\ \sigma_{33}(N_1) \\ \sigma_{31}(N_1) \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_s \begin{Bmatrix} v_1(N_2) \\ v_3(N_2) \\ \sigma_{33}(N_2) \\ \sigma_{31}(N_2) \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

Katı katman transfer matrisi \mathbf{T}_s Allard tarafından geliştirilmiştir; Eşitlik 3.27 ve Eşitlik 3.28'deki gibi formüle edilmiştir [19]:

$$\mathbf{T}_s = \Gamma_s(0) \cdot \Gamma_s(L)^{-1} \quad (3.27)$$

$$\Gamma_s(x_3) = \begin{bmatrix} \omega k_t \cos(k_{p3}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{p3}x_3) & j\omega k_{s3} \sin(k_{s3}x_3) & -\omega k_{s3} \cos(k_{s3}x_3) \\ -j\omega k_{p3} \sin(k_{p3}x_3) & \omega k_{p3} \cos(k_{p3}x_3) & \omega k_t \cos(k_{s3}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{s3}x_3) \\ -D_1 \cos(k_{p3}x_3) & jD_1 \sin(k_{p3}x_3) & 2jNk_t k_{s3} \sin(k_{s3}x_3) & -2Nk_t k_{s3} \cos(k_{s3}x_3) \\ 2jNk_t k_{p3} \sin(k_{p3}x_3) & 2jNk_t k_{p3} \cos(k_{p3}x_3) & N(k_{s3}^2 - k_t^2) \cos(k_{s3}x_3) & -jN(k_{s3}^2 - k_t^2) \sin(k_{s3}x_3) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Eşitlik 3.28’de kullanılan k_p boylamsal dalgalar için dalga sayısı, k_s ise enlemsel dalgalar için dalga sayısıdır. Her katmanda aynı olan teğet dalgalar için dalga sayısı k_t ile gösterilir. İkili simge olarak ifade edilen k_{p3} ve k_{s3} ise enlemsel ve boylamsal dalgaların x_3 yönündeki dalga sayısı bileşenidir. Eşitlik 3.29, 3.30 ve 3.31’de k_p , k_s , k_t , k_{p3} , k_{s3} dalga sayısı denklemleri gösterilmiştir.

$$k_t = \frac{\omega}{c} \sin(\theta) \quad (3.29)$$

$$k_{p3} = (k_p^2 - k_t^2) \text{ ve } k_{s3} = (k_s^2 - k_t^2) \quad (3.30)$$

$$k_p = \frac{\omega}{c_p} \text{ ve } k_s = \frac{\omega}{c_s} \quad (3.31)$$

$$D_1 = \lambda(k_{p3}^2 + k_t^2) + 2\mu k_{p3}^2 \quad (3.32)$$

Eşitlik 3.31’de kullanılan k_p boylamsal dalgalar için dalga sayısı, k_s enlemsel dalgalar için dalga sayısı hesaplamak için gerekli olan boylamsal dalgalar için katı ortamda dalga hızı c_p ve enlemsel dalgalar için katı ortamda dalga hızı c_s formülleri aşağıdaki gibidir.

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}, c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.28’de kullanılan N (MPa) shear modülü (kayma modülü) olup kullanılan malzeme için geçerli olan gerilim-kayma eğrisinin doğrusal parçasının eğimidir ve katı katman için Eşitlik 3.34’ de gösterildiği gibi μ lame katsayısına eşittir.

$$N = \mu \quad (3.34)$$

Eşitlik 3.33’de enlemsel ve boylamsal dalga hızı denklemlerinde kullanılan lame katsayıları λ ve μ olup Eşitlik 3.35 ve 3.36’da gösterilmiştir [2].

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.35)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.36)$$

Eşitlik 3.35 ve 3.36’da lame katsayılarını hesaplamak için poisson oranı ν ve young modülü E (GPa) kullanılmaktadır. Poisson oranı, ν normal gerilmelerin etkisi altında malzemede oluşan enine birim deformasyonun, boyuna birim deformasyona oranıdır. Young modülü E (GPa) ise malzemenin kuvvet altında şekil değiştirmesinin ölçüsüdür.

3.2.1.3. Gözenekli Katmanda Ses Dalga Denklemleri

Gözenekli katmanda sesin yayılımı, Biot Teorisi tarafından katı malzeme gerilme-deformasyon denklemleri ve enerji denklemlerinin düzenlenmesiyle açıklanmıştır [4]. Gözenekli malzemeler, bir katı bileşen ve bir sıvı bileşenden oluşur. Gözenekli malzemenin sıvı bileşeni standart sıcaklıkta ve basınçtaki hava olarak değerlendirilmektedir. Dalga yayılımı için Biot teorisinin temelleri Allard tarafından gözenekli malzemelerde tekrar çalışılmıştır [31].

Biot teorisine göre gerilme-deformasyon denklemleri Eşitlik 3.37' deki gibi yazılır [4].

$$\sigma_{ij}^s = \{(P - 2N)\theta^s + Q\theta^f\}\delta_{ij} + 2Ne_{ij}^s \quad \text{ve} \quad \sigma_{ij}^f = Q\theta^s + R\theta^f \quad (3.37)$$

Biot teorisi kapsamında ses partikülünün yer değiştirme denklemleri sıvı ve katı katman için boylamsal dalgalar ve enlemsel dalgalar değiştirme vektörü \mathbf{u} olarak, skalar ve vektörel potansiyeller φ ve Ψ için Eşitlik 3.38 ve 3.39 olarak yazılır [4].

Boylamsal dalgalar için ses partikülü yer değiştirme denklemleri:

$$\mathbf{u}^s = \nabla\varphi^s \quad \text{ve} \quad \mathbf{u}^f = \nabla\varphi^f \quad (3.38)$$

Enlemsel dalgalar için ses partikülü yer değiştirme denklemleri:

$$\mathbf{u}^s = \nabla \times \Psi^s \quad \text{ve} \quad \mathbf{u}^f = \nabla \times \Psi^f \quad (3.39)$$

Eşitlik 3.38 ve 3.39'da "s" karakteri gözenekli katman bileşeni olan katı bileşeni, "f" sıvı bileşeni (hava) temsil etmektedir. Parçacık yer değiştirmeleri ve gerilmeleri Eşitlik 3.20'de yerine koyulursa, φ^s , φ^f ve Ψ^s skalar ve vektörel potansiyelleri ile iki çözümü vardır.

İlk çözüm boylamsal dalgalar için Eşitlik 3.40'da gösterilmiştir.

$$-w^2 \mathbf{M}^{-1} \boldsymbol{\rho} \varphi = \nabla^2 \varphi \quad (3.40)$$

Eşitlik 3.40'daki \mathbf{M} matrisi elemanları Biot Teorisine göre elastiklik katsayılarıdır, $\boldsymbol{\rho}$ matrisi eylemsizlik katsayılarıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir [4]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} P & Q \\ Q & R \end{bmatrix} \quad P, Q, R \text{ elastiklik katsayıları} \quad (3.41)$$

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{12} & \rho_{22} \end{bmatrix} \quad \rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{22} \text{ eylemsizlik katsayıları} \quad (3.42)$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi^s \\ \varphi^f \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

İkinci çözüm ise Enlemsel dalgalar (shear wave) için Eşitlik 3.44'da gösterilmiştir.

$$\nabla^2 \Psi + \frac{\omega^2}{N} \left(\frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{22}} \right) \Psi = \mathbf{0} \quad (3.44)$$

Denklem 3.44, bir enlemsel dalganın vektörel yer değiştirmesi olarak sadece katı katman için $\Psi^s = \Psi$ olarak tanımlar. Buradan çıkarılan sonuç, gözenekli katmanlarda enlemsel dalgaların gözenekli katman sıvı bileşeni içinde yayılmadığı ve sıvı bileşenin durağan kabul edildiğidir.

Gözenekli bir materyalin sınırlarındaki akustik özellikler, katmanda yayılan altı dalga tarafından belirlenir. Bu dalgalar, katman boyunca yayılan iki boylamsal dalga ve bir enlemsel dalga ile Şekil 3.5'te gösterilen katman içindeki B sınırından yansıyan üç dalgadır. Sınırlardaki ses alanını temsil eden altı bağımsız nicelikler, $v_1^s, v_3^s, v_3^f, \sigma_{33}^s, \sigma_{13}^s$ ve σ_{33}^f dir. Katman sınırlarındaki bu nicelikler, sırası ile normal ve teğet hız bileşenleri, v_3^s, v_3^f, v_1^s ve normal ve enlemsel gerilme tensörü bileşenleri, $\sigma_{33}^s, \sigma_{33}^f, \sigma_{13}^s$ şeklindedir. Gözenekli katman transfer matrisi T_p ile belirtilen altı bilinmeyenli denklemler sistemi Eşitlik 3.45'te verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} v_1^s(N_1) \\ v_3^s(N_1) \\ v_3^f(N_1) \\ \sigma_{33}^s(N_1) \\ \sigma_{13}^s(N_1) \\ \sigma_{33}^f(N_1) \end{Bmatrix} = T_p \begin{Bmatrix} v_1^s(N_2) \\ v_3^s(N_2) \\ v_3^f(N_2) \\ \sigma_{33}^s(N_2) \\ \sigma_{13}^s(N_2) \\ \sigma_{33}^f(N_2) \end{Bmatrix} \quad (3.45)$$

Transfer matrisi T_p 'nin tüm elemanları, Allard'ın çalışmaları kullanılarak zamana bağlı $e^{j\omega t}$ ile ifade edilmiş ve ilk katmana gelen dalganın pozitif x_3 yönünde olduğu varsayılarak geliştirilmiştir [30-32]. Gözenekli katman transfer matrisi T_p Allard tarafından geliştirilmiş ve Eşitlik 3.46 ve 3.47'de formüle edilmiştir [30-32].

$$T_p = \Gamma_p(0). \Gamma_p(l)^{-1} \quad (3.46)$$

$$\Gamma_p(x_3) = \begin{bmatrix} \omega k_t \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{13}x_3) & \omega k_t \cos(k_{23}x_3) \\ -j\omega k_{13} \sin(k_{13}x_3) & \omega k_{13} \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_{23} \sin(k_{23}x_3) \\ -j\omega k_{13} \mu_1 \sin(k_{13}x_3) & \omega k_{13} \mu_1 \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_{23} \mu_2 \sin(k_{23}x_3) \\ -D_1 \cos(k_{13}x_3) & jD_1 \sin(k_{13}x_3) & -D_2 \cos(k_{23}x_3) \\ 2jNk_t k_{13} \sin(k_{13}x_3) & -2Nk_t k_{13} \cos(k_{13}x_3) & 2jNk_t k_{23} \sin(k_{23}x_3) \\ -E_1 \cos(k_{13}x_3) & jE_1 \sin(k_{13}x_3) & -E_2 \cos(k_{23}x_3) \\ -j\omega k_t \sin(k_{23}x_3) & j\omega k_{33} \sin(k_{33}x_3) & -\omega k_{33} \cos(k_{33}x_3) \\ \omega k_{23} \cos(k_{23}x_3) & \omega k_t \cos(k_{33}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{33}x_3) \\ \omega k_{23} \mu_2 \cos(k_{23}x_3) & \omega k_t \mu_3 \cos(k_{33}x_3) & -j\omega k_t \mu_3 \sin(k_{33}x_3) \\ jD_2 \sin(k_{23}x_3) & 2jNk_t k_{33} \sin(k_{33}x_3) & -2Nk_t k_{33} \cos(k_{33}x_3) \\ -2Nk_t k_{23} \cos(k_{23}x_3) & N(k_{33}^2 - k_t^2) \cos(k_{33}x_3) & N(k_{33}^2 - k_t^2) \sin(k_{33}x_3) \\ jE_2 \sin(k_{23}x_3) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Her katmanda aynı olan teğet dalgalar için dalga sayısı Eşitlik 3.48’de verilmiştir.

$$k_t = \frac{\omega}{c} \sin(\theta) \quad (3.48)$$

Eşitlik 3.49, 3.50 ve 3.51’de belirtilen δ_1 , δ_2 ve δ_3 gözenekli katmanda içerisinde yayılan üç Biot dalgası için dalga sayısını verir. İndex olarak belirtilen 1 ve 2 boylamsal dalga sayısını, 3 olarak belirtilen ise enlemsel dalga sayısını verir [4].

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Delta}] \quad (3.49)$$

$$\delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} + \sqrt{\Delta}] \quad (3.50)$$

$$\delta_3^2 = \frac{\omega^2}{N} \left(\frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{22}} \right) \quad (3.51)$$

$$\Delta = (P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12})^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2) \quad (3.52)$$

Eşitlik 3.53, 3.54 ve 3.55 ile belirtilen ve Eşitlik 3.47’de kullanılan oranlar, gözenekli malzemedeki hız oranları olup dalganın yayılım gösterdiği baskın ortamı belirtir. İndex olarak belirtilen 1 ve 2 boylamsal dalga, 3 olarak belirtilen ise enlemsel dalgadır.

$$\mu_i = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2\rho_{11}}{\omega^2\rho_{12} - Q\delta_i^2} \quad i = 1,2 \quad \mu_3 = -\frac{\rho_{12}}{\rho_{22}} \quad (3.53)$$

$$E_i = (R\mu_i + Q)(k_t^2 + k_{i3}^2) \quad i = 1,2 \quad (3.54)$$

$$D_i = (P + Q\mu_i)(k_t^2 + k_{i3}^2) - 2Nk_t^2 \quad i = 1,2 \quad (3.55)$$

Eşitlik 3.53, 3.54 ve 3.55’de kullanılan P , Q , R Biot teorisine göre elastiklik katsayılarıdır ve Eşitlik 3.56 ile formüle edilir [4].

$$P = \frac{4}{3}N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi}K_f, \quad Q = K_f(1 - \phi) \text{ ve } R = \phi K_f \quad (3.56)$$

Eşitlik 3.56’da kullanılan sabitler gözenekli malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu sabitler, bir kütleli çepçevre saran basınç altındaki sıkışmasının ölçüsü olan hacimsel modülü K_b (MPa) gözenekli yapıda sıvı hacimsel modülü K_f (MPa) gerilim-kayma eğrisinin doğrusal parçasının eğimi olan shear modülü N (MPa), toplam gözenek hacminin, toplam yutum malzemesine oranı olan ϕ gözeneklilik şeklindedir.

Biot teorisine göre eylemsizlik katsayıları ρ_{11} , ρ_{12} , ρ_{22} olmak üzere Eşitlik 3.57 de ifade edilir [4].

$$\begin{aligned} \rho_{11} &= \rho_0 + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \\ \rho_{12} &= -\rho_a + j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \end{aligned} \quad (3.57)$$

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

Eşitlik 3.57'de ρ_a gözenekli katman yoğunluğu (kg/m^3), ρ_0 gözenekli malzemedeki hava yoğunluğudur (kg/m^3) ve $G(\omega)$ katsayısı aşağıda belirtilmiştir:

$$\rho_a = \rho_0 \phi (\alpha - 1) \text{ ve } G(\omega) = \left(1 + \frac{4j\alpha^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.58)$$

Katsayı olan $G(\omega)$ 'de kullanılan sabitler gözenekli malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu sabitler, hava akış direnci σ (kg/m^3s) olup havanın gözenekli bir yapı içerisine ne kadar nüfuz edebildiğini ve bu sırada maruz kaldığı direnci gösteren bir özelliktir.

Yapısal sönüm kayıp oranı η olup, yapı içinde sönümleme söz konusu olduğunda kullanılır. Yapısal sönüm frekansa bağlı olarak değişen bir orandır ve frekans arttıkça yapısal sönüm değerleri düşer. Gözeneklerin şekline göre sürtünme kayıpları ile oluşan enerji yutumu viskozite boyutu Λ (m) ile gösterilir.

Bükümlülük α gözeneklerin oluşturduğu kanalların malzeme içinde ne kadar kıvrımlı bir yol izlediğini tanımlayan özellik olup, malzeme içindeki birbirine bağlı gözeneklerin oluşturduğu ses yayılım kanalları uzunluğunun, malzemenin kalınlığına oranlanmasıyla bulunur. Malzemedeki ses yayılım kanalı, malzeme kalınlığına eşit olduğu durumda bükümlülük "1"e eşittir. Bükümlülük arttıkça, bu değer 1'in üzerine çıkmaktadır. Bir önceki paragrafta ϕ gözeneklilik ve ρ_0 gözenekli malzemedeki hava yoğunluğu anlatılmıştır.

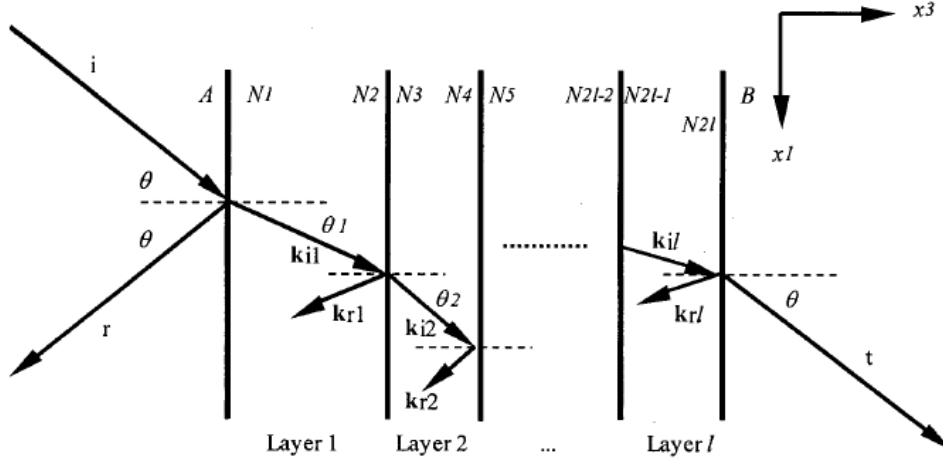
3.2.2. Çok Katmanlı Yapılarda Sesin Yayılımı ve Dalga Denklemleri

Tek katmanlı yapılar için transfer matrisi metodu, sıvı, katı ve gözenekli malzemeler için açıklanmıştır. Bu bölümde ise çok katmanlı yapılarda transfer matrisinin nasıl belirlendiği ve iki katman arası sınır koşullarını sağlayan arayüz matrisleri açıklanacaktır. Bu bilgiler doğrultusunda çok katmanlı yapılarda yansıma katsayısının, transfer katsayısının ve iletim kaybının nasıl hesaplandığı gösterilecektir.

Tek bir katman için transfer matris yaklaşımı, bu katmanın kalınlığını (normal yüzeyi boyunca) sınırlı, diğer yönlerde ise sonsuza uzanan bir ortam varsayılarak malzeme akustik performansını hesaplamada yeterlidir. Ancak, günümüzde kullanılan gerçek yapılarda yüzey çok nadir olarak tek bir katmandan veya malzeme türünden oluşur. Bu yüzden, yüzeyleri tipik bir yapıyı temsil edecek şekilde, çok katmanlı olarak da modellemek gerekmektedir.

Şekil 3.6'da çok katmanlı bir yapıda ses dalgasının yayılımı gösterilmiştir. Dalganın geldiği taraf hava ile diğer taraf ise katı, sıvı ve ya gözenekli malzeme ile sınırlandırılmış

1, 2, ..., l tane katman bulunmaktadır. Her iki komşu sınır için, i ve i+1 noktalarında, denklemler seti arayüzün tüm sınır koşullarını sağlar. İki komşu katman arasındaki sınırdaki yer değiştirmenin sürekliliği ve kuvvet dengesi korunmak zorundadır. Bu yüzden, sınırlardaki homojen denklemler seti hız ve gerilme bileşenleri cinsinden yazılır ve iki arayüz matrisi olan **I** ve **J** matrisleri ile açıklanır.



Şekil 3.6. Çok katmanlı yapıda ses dalgasının yayılması. Gelen dalga "i" ile, yansıyan dalga "r" ile, iletilen dalga ise "t" ile gösterilmiştir [2]

Şekil 3.6'ya göre, farklı yapıda iki katman arasındaki sınır koşullarından türetilen arayüz matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanır. Alt index m,n olarak gösterim katman yapısını belirtmekle birlikte sıvı (f), katı (s) ya da gözenekli (p) katman olabilir.

1. Çok katmanlı yapıda hava katmanından, ilk katmana geçiş sınırında arayüz matrisleri Eşitlik 3.59 ile açıklanır.

$$\mathbf{I}_{f,n} \cdot V(N_A) + \mathbf{J}_{f,n} \cdot V(N_1) = 0 \quad m, n \in \{f, s, p\} \text{ ve } i = 1, 2, 3, \dots, 2l \quad (3.59)$$

2. Çok katmanlı yapı içerisinde katı, sıvı ya da gözenekli bir katmandan diğer katmana geçiş sınırında arayüz matrisleri Eşitlik 3.60 ile açıklanır.

$$\mathbf{I}_{m,n} \cdot V(N_i) + \mathbf{J}_{m,n} \cdot V(N_{i+1}) = 0 \quad m, n \in \{f, s, p\} \text{ ve } i = 1, 2, 3, \dots, 2l \quad (3.60)$$

3. Çok katmanlı yapıda son katmandan hava ya da katı katmana geçiş sınırında arayüz matrisleri Eşitlik 3.61 ile açıklanır.

$$\mathbf{I}_{m,n} \cdot V(N_{2l}) + \mathbf{J}_{m,n} \cdot V(N_B) = 0 \quad m, n \in \{f, s, p\} \text{ ve } i = 1, 2, 3, \dots, 2l \quad (3.61)$$

$V(N_{i+1}) = \mathbf{T}_n \cdot V(N_{i+2})$ eşitliği ile Eşitlik 3.59, 3.60 ve 3.61 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{I}_{m,n} \cdot V(N_i) + \mathbf{J}_{m,n} \cdot \mathbf{T}_n \cdot V(N_{i+2}) = 0 \quad i = A, 2, 4, 6, \dots, 2l, B \quad (3.62)$$

Farklı yapıda iki katman arasındaki sınır koşullarından türetilen arayüz matrisleri Brouard tarafından tanımlanmıştır [28].

Katı katmandan, gözenekli katmana geçişte arayüz matrisinin çıkartılması aşağıda gösterilecektir. Diğer malzeme türleri için katmanlar arası geçiş de arayüz matrisleri benzer bir şekilde üretilebilir. Bu diğer malzeme türleri için katmanlar için sınır koşullarını belirten arayüz matrisleri Bölüm 3.2.4'te ayrıca gösterilecektir.

Katı katmandan, gözenekli katmana geçişte arayüz matrisinin çıkartılması, katı-gözenekli arayüz için sınır koşullarının yazılması ile başlar. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi "Katman 1" bir katı ve "Katman 2" bir gözenekli malzemedir. O hâlde N_2 ve N_3 noktalarındaki sınır koşulları, normal ve teğet hız bileşenleri, v_3 ve v_1 ile normal ve enlemsel gerilme tensörü bileşenleri σ_{33} ve σ_{13} kullanılarak Eşitlik 3.63'teki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} v_3^s(N_1) &= v_3^s(N_2) = v_3^f(N_3) \\ v_1^s(N_2) &= v_1^s(N_3) \\ \sigma_{13}^s(N_2) &= \sigma_{13}^s(N_3) \\ \sigma_{33}^s(N_2) &= \sigma_{33}^f(N_3) + \sigma_{33}^s(N_3) \end{aligned} \quad (3.63)$$

Eşitlik 3.63 ile belirtilen sınır koşulları matris formda bir homojen denklemler seti olarak yazılır:

$$\mathbf{I}_{s,p} \cdot V(N_2) + \mathbf{J}_{s,p} \cdot V(N_3) = 0 \quad (3.64)$$

$$V(N_2) = \{v_1^s(N_2) \ v_3^s(N_2) \ \sigma_{33}^s(N_2) \ \sigma_{13}^s(N_2)\}^T \quad (3.65)$$

$$V(N_3) = \{v_1^s(N_3) \ v_3^s(N_3) \ v_3^f(N_3) \ \sigma_{33}^s(N_3) \ \sigma_{13}^s(N_3) \ \sigma_{33}^f(N_3)\}^T \quad (3.66)$$

Ses dalgası normal ve teğet hız bileşenleri, v_3 ve v_1 ile normal ve enlemsel gerilme tensörü bileşenleri σ_{33} ve σ_{13} kullanılarak oluşturulan $V(N_2)$ ve $V(N_3)$ vektörleri Eşitlik 3.64'te yerine konulursa $\mathbf{I}_{s,p}$ ve $\mathbf{J}_{s,p}$ katı katmandan gözenekli katmana geçiş arayüz matrisleri Eşitlik 3.67 ve 3.68 olarak belirlenir.

$$\mathbf{I}_{s,p} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$\mathbf{J}_{s,p} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Katı katman olan "Katman 1" ve gözenekli katman olan "Katman 2" için arayüz matrisleri Eşitlik 3.69'da gösterildiği şekilde yer değiştirebilir.

$$\mathbf{I}_{p,s} = \mathbf{J}_{s,p} \text{ ve } \mathbf{J}_{p,s} = \mathbf{I}_{s,p} \quad (3.69)$$

Şekil 3.6'da gösterilen l sayıdaki çok katmanlı bir yapının akustik özelliklerini belirlemek için, yapının $N1$ noktasından $N2l$ noktasına kadar olan tüm sınırlarında (ilk katman ve son katman sınırları hariç) Eşitlik 3.62'in gerçekleşmesi gereklidir. Bu gerçekleşen tüm sınır koşullarının bileşimi, matris formunda ifade edilen bir homojen denklemler setini verir ve Eşitlik 3.70'te \mathbf{D} matrisi ile ifade edilir

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{V}_D = 0 \quad (3.70)$$

Ses dalgası normal ve teğet hız bileşenleri ile normal ve enlemsel gerilme tensörü bileşenleri kullanılarak oluşturulan \mathbf{V}_D vektörü son katmanın hava ya da katı olmasına göre değişmektedir. Her iki durum için \mathbf{V}_D vektörü ve \mathbf{D} matrisi aşağıda belirtilmiştir.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{12} & E_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & D_{23} & E_{23} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & D_{m-1,n-1} & E_{m-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & D_{m,n} & E_{m,n} \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$\mathbf{D}_{m,n} = \mathbf{I}_{m,n} \text{ ve } \mathbf{E}_{m,n} = \mathbf{J}_{m,n} \cdot \mathbf{T}_i$$

$$m = i, n = i + 1 \text{ ve } i = 1, 2, 3, \dots, l$$

Şekil 3.6'da B ile belirtilen son katmanın sıvı katman ise:

$$\mathbf{V}_D = \{p(A) \quad v_3^f(A) \quad V(N_2) \quad V(N_4) \quad \dots \quad V(N_{2l}) \quad p(B) \quad v_3^f(B)\}^T \quad (3.72)$$

Şekil 3.6'da B ile belirtilen son katmanın katı katman ise:

$$\mathbf{V}_D = \{p(A) \quad v_3^f(A) \quad V(N_2) \quad \dots \quad V(N_{2l}) \quad v_3^s(B) \quad v_1^s(B) \quad \sigma_{33}^s(B) \quad \sigma_{13}^s(B)\}^T \quad (3.73)$$

Yukarıda, ses yayılımı katman içerisinde, $N1$ noktasından $N2l$ noktasına kadar tanımlanmıştır. Ses dalgası yayılımı ses dalgasının ilk geldiği katman sınırının dışında da (Şekil 3.6'daki A noktasında) biliniyor olmalıdır. Bu A noktasındaki ses alanının hesaplanması için $A-N1$ ve $N2l-B$ arayüz sınır koşulları da Eşitlik 3.71'e dâhil edilmelidir. Bunun için ilk adım, $N2l-B$ arayüzü olan son sınır koşulları belirlemektir. $N2l-B$ sınırı için iki durum mevcuttur. Birisi dış ortamın sıvı katman yapısında olması, diğeri ise dış ortamın katı katman yapısında olmasıdır. Dış ortamın sıvı katman olması durumunda B katmanındaki normal yüzey empedansı, sıvı katmanın karakteristik empedansının dik bileşenidir. Bu nedenle, Eşitlik 3.71'deki son arayüz matrisi $\mathbf{J}_{m,f}$ olarak tanımlanır. Alt index olarak kullanılan m , katı için s , gözenekli materyaller için p ile gösterilir. Dış ortamın katı katman olması durumunda, B noktasında yer değiştirme yoktur bu yüzden hızlar sıfırdır ve son arayüz matrisi $\mathbf{J}_{m,s}$ olarak tanımlanır. Alt index olarak kullanılan m ,

sıvı için f , gözenekli materyaller için p olarak gösterilir.

$N2l-B$ arayüzündeki iki sınır koşulu dış ortamın sıvı katman (hava) olması durumunda Eşitlik 3.74 ile katı katman olması durumunda Eşitlik 3.75 ile açıklanır.

Dış ortamın sıvı olarak değerlendirilen hava katmanı olması durumunda B katmanındaki normal yüzey empedansı $Z_C = 415 \text{ rayls}$ hava karakteristik empedansı olur ve $N2l-B$ sınır koşulu Eşitlik 3.74 ile gösterilir.

$$\frac{p(B)}{v_3^f(B)} = Z_B = \frac{Z_C}{\cos \theta} \quad (3.74)$$

Dış ortamın bükülmez katı katman durumunda $N2l-B$ sınır koşulu Eşitlik 3.75 ile gösterilir.

$$v_3^s(B) = v_1^s(B) = 0 \quad (3.75)$$

$N2l-B$ sınır koşulunu hesaba katmak için, Eşitlik 3.71'in sonuna satır olarak eklenir. Elde edilen \mathbf{D}' matrisi, dış ortamın sıvı katman olmasına göre Eşitlik 3.76 ile katı katman olmasına göre Eşitlik 3.77 ile açıklanır

Dış ortamın sıvı katman olması durumunda:

$$\mathbf{D}' = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \mathbf{D} & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -Z_B \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Dış ortamın katı katman olması durumunda

$$\mathbf{D}' = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \mathbf{D} & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

A noktasındaki ses alanın hesaplanması için ikinci adım, $A-Nl$ arayüzü için sınır koşulları belirlemektir. Eşitlik 3.78 $A-Nl$ arayüzü için sınır koşullarıdır. A katmanı normal yüzey empedansı Z_A bilinmeyendir ve \mathbf{D}' matrisi kullanılarak hesaplanacaktır. Nasıl hesaplandığı ileriki bölümde yansıma katsayısının hesaplanması sırasında gösterilecektir.

$$\frac{p(A)}{v_3^f(A)} = Z_A \quad (3.78)$$

İkinci adımda hesaplanan $A-Nl$ arayüzü için sınır koşulları ise \mathbf{D}' matrisinin ilk satırına eklenerek hesaba katılır. Böylece A noktasından B noktasına kadar ses yayılımını tanımlayan bir \mathbf{D}'' matrisi elde edilmiştir:

$$\mathbf{D}'' = \begin{bmatrix} 1 & -Z_A & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \mathbf{D}' & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

A noktasından B noktasına ses yayılımının hesaplanması için $A-Nl$ ve $N2l-B$ arayüz sınır koşullarının Eşitlik 3.71'e dâhil edilmesi ile elde edilen \mathbf{D}'' matrisi Eşitlik 3.70'i sağlar ve Eşitlik 3.80 ile hesaplanır. V_D Eşitlik 3.72 ve 3.73' de l sayıda katman için tanımlanmıştır.

$$\mathbf{D}'' \cdot V_D = \mathbf{0} \quad (3.80)$$

Bu matris ilişkisinden A katmanı normal yüzey empedansı Z_A bilinmeyi hesaplanır ve böylece yansıtma katsayısı, transfer katsayısı ve transfer kaybı hesabı için girdi olarak kullanılır. Bir sonraki bölümde yansıtma katsayısı, transfer katsayısı ve transfer kaybı hesabı anlatılacaktır.

3.2.3. Ses Dalgası İçin Yansıtma Katsayısı, Transfer Katsayısı ve Transfer Kaybı Hesaplamaları

3.2.3.1. Ses Dalgası İçin Yansıtma Katsayısının Hesaplanması

A katmanında ki Z_A normal yüzey empedansı Eşitlik 3.80 kullanılarak hesaplanır. Homojen denklemler setinden oluşan \mathbf{D}'' matrisinin tek çözümü determinantının sıfır olduğu durumdur.

$$|D''| = |D'_1| + Z_A \cdot |D'_2| = 0 \quad (3.81)$$

Eşitlik 3.81 kullanılarak A katmanının normal yüzey empedansı yazılabilir:

$$Z_A = \frac{|D'_1|}{|D'_2|} \quad (3.82)$$

$|D'_1|$, \mathbf{D}' matrisinin ilk sütunu atılarak hesaplanan determinantıdır. $|D'_2|$ ise \mathbf{D}' matrisinin ikinci sütunu atılarak hesaplanan determinantıdır.

Katman A için karakteristik yüzey empedansının Z_A hesaplanması ile A katmanına θ açısı ile gelen ses dalgası için A katmanından yansıtma katsayısı R_A Eşitlik 3.83 ile hesaplanır.

$$R_A = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (3.83)$$

Son katmanın hava olması durumunda $Z_C = 415 \text{ rayls}$ hava karakteristik empedansı olmak üzere $Z_B = \frac{Z_C}{\cos \theta}$ olarak alınır. Ses dalgasının yüzeye geliş açısının $\theta = 0$ olduğu durumda, katman B için karakteristik yüzey empedansı $Z_B = Z_C = 415 \text{ rayls}$ hava karakteristik empedansına eşit olur.

3.2.3.2. Ses Dalgası İçin Transfer Katsayısının Hesaplanması

Ses Dalgası transfer katsayısının T hesaplanması için Eşitlik 3.9'dan türetilen Eşitlik 3.84'ün \mathbf{D}' matrisinin ilk satırına eklenerek hesaba katılır ve \mathbf{D}''' matrisi elde edilir.

$$\frac{P(A)}{P(B)} = -\frac{1+R}{T} \quad (3.84)$$

$$\mathbf{D}''' = \begin{bmatrix} -\frac{1+R}{T} & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{D} & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & -Z_B \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Homojen denklemler setinden oluşan \mathbf{D}''' matrisinin tek çözümü determinantının sıfır olduğu durumdur.

$$T = (1 + R) \frac{|D_7'|}{|D_1'|} \quad (3.86)$$

$|D_1'|$, \mathbf{D}' matrisinin ilk sütunu kaldırılarak hesaplanan determinantıdır. $|D_7'|$, \mathbf{D}' matrisinin yedinci sütunu kaldırılarak hesaplanan determinantıdır.

3.2.3.3. Ses Dalgası İçin Transfer Kaybının Hesaplanması

Ses yalıtımı açısından, bir malzemenin ses iletim katsayısının küçük olması, dolayısı ile ses transfer kaybının büyük olması istenir. Bir malzemenin ses transfer kaybı, frekans, malzeme özellikleri ve özellikle yüzey yoğunluğuna bağlı olarak değişir.

Ses transfer kaybı, bir malzemenin, ses yalıtım kapasitesini desibel (dB) cinsinden logaritmik olarak veren bir özelliğidir. Ses transfer kaybı:

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) (dB) \quad (3.87)$$

Eşitlik 3.87'de, W_1 malzemenin üzerine gelen toplam ses enerjisi, W_2 ise transfer edilen ses enerjisidir. Ses transfer kaybı, ses dalgası transfer katsayısı kullanılarak Eşitlik 3.88'de gösterildiği gibi hesaplanır. Bu tez çalışmasında transfer kaybının analizi ses dalgası transfer katsayısı kullanılarak yapılacaktır:

$$TL = -20 \log(T) (dB) \quad (3.88)$$

3.2.4. Çok katmanlı Yapılarda Katmanlar Arası Sınır Koşul Denklemleri ve Arayüz Matrisleri

Farklı yapıdaki iki katman arasında sınır koşullarından türetilen arayüz matrisleri Brouard ve arkadaşları tarafından tanımlanmıştır [28]. Sınır koşullarından türetilen bu arayüz matrisleri \mathbf{I} ve \mathbf{J} olarak tanımlanmış ve bir önceki bölümde katı katman ile gözenekli katman arası sınır koşul denklemlerinin ve arayüz matrislerinin nasıl türetildiği gösterilmiştir. Diğer malzeme yapıları ile katmanlı olarak sıralanan yapılar için de sınır koşul denklemleri ve arayüz matrisleri benzer bir biçimde elde edilebilir. Sınır koşulları, aynı arayüz matrisini paylaşan iki katmanın özelliklerine bağlı olarak değişir. Şekil 3.6'da gösterilen N_2 ve N_3 noktalarında sınır koşullarını sağlayan denklemler, farklı katman ve aynı katman tipleri için (katı, sıvı ve gözenekli) Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

İki farklı katman ve ya aynı katman tipleri için Çizelge 3.1'de belirtilen sınır koşulları kullanılarak oluşturulan $V(N_2)$ ve $V(N_3)$ vektörleri sınır koşulları matris formunda bir homojen denklemler seti olarak Eşitlik 3.65 ve 3.66'da belirtildiği gibi yazılır ve Eşitlik

3.64'te yerine konulursa iki farklı katman için arayüz matrisleri elde edilir. Çizelge 3.2'de çok katmanlı yapılarda farklı özellikteki katmanlar için sınır koşullarını sağlayan arayüz matrisleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Çok katmanlı Yapılarda Sınır Koşulları Denklemleri

| Katman Tipi | Sınır Koşullarını Sağlayan Denklemler |
|--|--|
| Sıvı-sıvı katman (<i>f-f</i>) sınır koşulları | $p(N_2) = p(N_3)$ $v_3^f(N_2) = v_3^f(N_3)$ |
| Katı-katı katman (<i>s-s</i>) sınır koşulları | $\sigma_{33}^s(N_2) = \sigma_{33}^s(N_3)$ $\sigma_{13}^s(N_2) = \sigma_{13}^s(N_3)$ $v_3^s(N_2) = v_3^s(N_3)$ $v_1^s(N_2) = v_1^s(N_3)$ |
| Gözenekli-gözenekli katman (<i>p-p</i>) sınır koşulları | $\sigma_{33}^f(N_2) + \sigma_{33}^s(N_2) = \sigma_{33}^f(N_3) + \sigma_{33}^s(N_3)$ $\sigma_{13}^s(N_2) = \sigma_{13}^s(N_3)$ $\frac{\sigma_{33}^f(N_2)}{\phi_{N_2}} = \frac{\sigma_{33}^f(N_3)}{\phi_{N_3}}$ $\phi_{N_2} (v_3^f(N_2) - v_3^s(N_2)) = \phi_{N_3} (v_3^f(N_3) - v_3^s(N_3))$ $v_3^s(N_2) = v_3^s(N_3)$ $v_1^s(N_2) = v_1^s(N_3)$ |
| Sıvı-katı katman (<i>f-s</i>) sınır koşulları | $-p(N_2) = \sigma_{33}^s(N_3)$ $0 = \sigma_{13}^s(N_3)$ $v_3^f(N_2) = v_3^s(N_3)$ |
| Sıvı-gözenekli katman (<i>f-p</i>) sınır koşulları | $v_3^f(N_2) = (1 - \phi_{N_3})v_3^s(N_3) + \phi_{N_3}v_3^f(N_3)$ $-\phi_{N_3}p(N_2) = \sigma_{33}^f(N_3)$ $0 = \sigma_{13}^s(N_3)$ $-(1 - \phi_{N_3})p(N_2) = \sigma_{33}^s(N_3)$ |
| Katı-gözenekli katman (<i>s-p</i>) sınır koşulları | $v_3^s(N_2) = v_3^s(N_3) = v_3^f(N_3)$ $v_1^s(N_2) = v_1^s(N_3)$ $\sigma_{13}^s(N_2) = \sigma_{13}^s(N_3)$ $\sigma_{33}^s(N_2) = \sigma_{33}^f(N_3) + \sigma_{33}^s(N_3)$ |

Çizelge 3.2. Çok katmanlı Yapılarda Sınır Koşullarını Sağlayan Arayüz Matrisleri

| Sınır Koşullarını Sağlayan Arayüz Matrisleri | |
|--|--|
| Katman Tipi | |
| Sıvı-sıvı katman (<i>f-f</i>) sınır koşullarını sağlayan arayüz matrisleri | $I_{f,f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ $J_{f,f} = -I_{f,f} = -\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| Katı-katı katman (<i>s-s</i>) sınır koşullarını sağlayan arayüz matrisleri | $I_{s,s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $J_{s,s} = -I_{s,s} = -\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| Gözenekli-gözenekli katman (<i>p-p</i>) sınır koşullarını sağlayan arayüz matrisleri | $I_{p,p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $J_{p,p} = -\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{\phi_{N_3}}{\phi_{N_2}} & \frac{\phi_{N_3}}{\phi_{N_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 - \frac{\phi_{N_2}}{\phi_{N_3}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\phi_{N_2}}{\phi_{N_3}} \end{bmatrix}$ |
| Sıvı-katı katman (<i>f-s</i>) sınır koşullarını sağlayan arayüz matrisleri | $I_{f,s} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ $J_{f,s} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |

Sıvı-gözenekli katman ($f-p$)
sınır koşullarını sağlayan
arayüz matrisleri

$$I_{f,p} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \phi_{N_3} & 0 \\ (1 - \phi_{N_3}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{f,p} = - \begin{bmatrix} 0 & (1 - \phi_{N_3}) & \phi_{N_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Katı-gözenekli katman ($s - p$)
sınır koşullarını sağlayan
arayüz matrisleri

$$I_{s,p} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{s,p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

4. TRANSFER MATRİS METODU

Bu tez çalışmasında çok katmanlı yapıların akustik performansının analizi için kullanılan Transfer Matris (TMM) modeli, Windows tabanlı bir bilgisayar ile gerçekleştirilen MATLAB programı ve fonksiyonları kullanılarak yazılan .m uzantılı dosyalardan oluşmaktadır. Transfer Matris Programı katmanların malzeme özellikleri girdi olarak kullanıldığında, çok katmanlı bir yüzey için akustik performans özelliklerini verir. Belirli bir geliş açısı ile yüzeye gelen ses dalgası için, istenilen frekans aralığında yansıma katsayısı, transfer katsayısı ve transfer kayıpları transfer matris programı kullanılarak elde edilen çıktılardır.

4.1. Transfer Matris Metodu Uygulaması

Transfer Matris Metodu katman kalınlığını (normal yüzeyi boyunca) sınırlı, diğer yönlerde ise sonsuza uzanan bir ortam için uygulanır. Program girdi olarak analiz edilen yüzey özellikleri ve gelen ses dalgası özellikleri olan frekans, ses dalgası geliş açısı, katman yapısı (sıvı-katı-gözenekli) ve son katman sonrası dış ortam özelliğini (sıvı katman olarak hava ya da katı katman) kullanır. Program çıktı olarak yüzey empedansı, yansıma katsayısı, emilim katsayısı, transfer katsayısı ve transfer kaybını verir. Katman yapısına (sıvı-katı-gözenekli) bağlı olarak yazılan transfer matris metodu MATLAB programının girdi olarak kullandığı malzeme parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

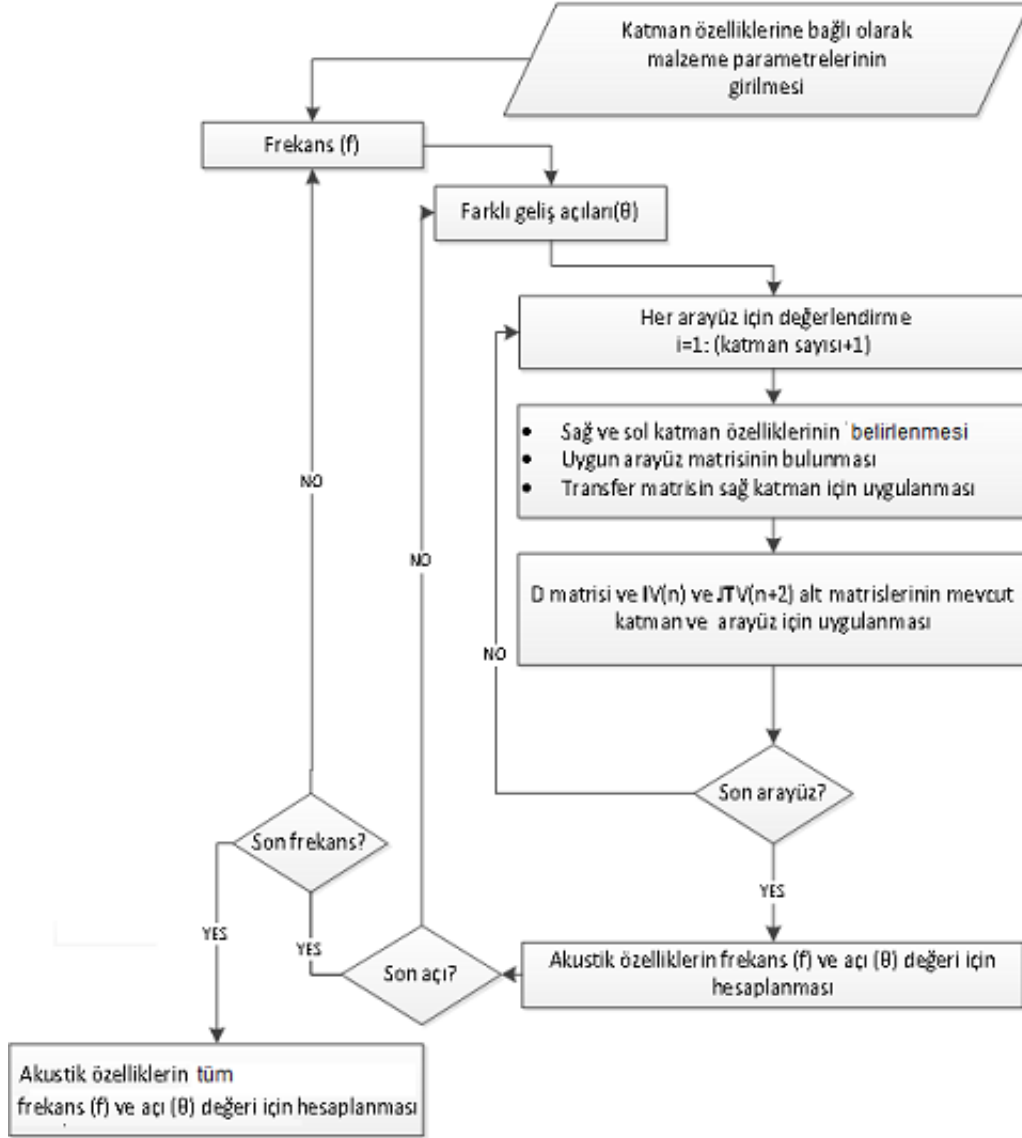
Çizelge 4.1. Sıvı, katı, gözenekli katman yapısına bağlı olarak yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB programına girdi olarak kullanılan malzeme parametreleri

| Malzeme Parametreleri | Sıvı Katman | Katı Katman | Gözenekli Katman |
|---|-------------|-------------|------------------|
| Katman Kalınlığı (<i>mm</i>) | ✓ | ✓ | ✓ |
| Yoğunluk (<i>kg/m³</i>) | ✓ | ✓ | ✓ |
| Ses hızı (<i>m/s</i>) | ✓ | ✓ | - |
| Young Modülü (<i>GPa</i>) | - | - | - |
| Shear Modülü (<i>MPa</i>) | - | - | ✓ |
| Poisson Oranı | - | ✓ | ✓ |
| Hava Akış Direnci (<i>kg/m³.s</i>) | - | - | ✓ |
| Bükümlülük | - | - | ✓ |
| Gözeneklilik | - | - | ✓ |
| Viskozite Boyutu (m) | - | - | ✓ |
| Termal Boyutu (m) | - | - | ✓ |

4.2. Transfer Matris Metodu Algoritması

Transfer Matris Metodu (TMM) algoritması Şekil 4.1’de belirtilmiştir. Transfer Matris Metodunun en önemli noktası, ikili döngü ile yüzey empedansının Z_A her açı ve her frekansta hesaplanmasıdır. Bu yüzey empedansı her arayüzde geçerli olan sınır koşulları denklemleri (Eşitlik 3.78 ve 3.82) kullanılarak hesaplanır. Herhangi bir geliş açısı ile

yüzeye gelen ses dalgası için yansıma katsayısı, transfer katsayısı ve transfer kaybı istenilen frekans boyunca Eşitlik 3.83, 3.86 ve 3.88 kullanılarak hesaplanır.



Şekil 4.1. Transfer Matris Metodu (TMM) algoritması

5. LİTERATÜRDE TEK VE ÇOK KATMANLI YAPILARLA İLGİLİ TASARIMLAR

Bu bölümde modelleme çalışmalarına başlamadan önce, literatürde yapılan çalışmalardan bazıları seçilerek doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışma ile malzemenin özellikleri iyi bilindiği takdirde ses iletim kaybı, ses iletim katsayıları, ses yansımaya katsayıları ve malzeme normal empedans değerleri için literatür ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.

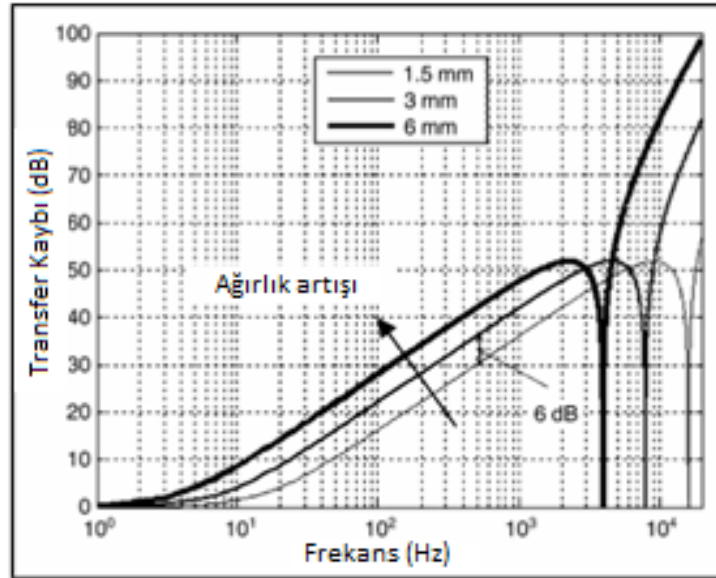
5.1. Literatürde Kullanılan Tek Katmanlı Yapıların Akustik Performans Analizleri

Bu çalışmada, ilk olarak literatürde akustik performans analizi için kullanılan tek katmanlı çelik yapı incelenmiş ve çelik katman yüzeyine gelen ses dalgası için transfer kaybı değerleri elde edilmiştir. Benzer çalışma Abes'in makalesinde de yer almıştır [3]. Ses transfer kaybı TL (dB) değerlerinin incelendiği bu çalışmada, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görüldüğü gibi literatür ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.

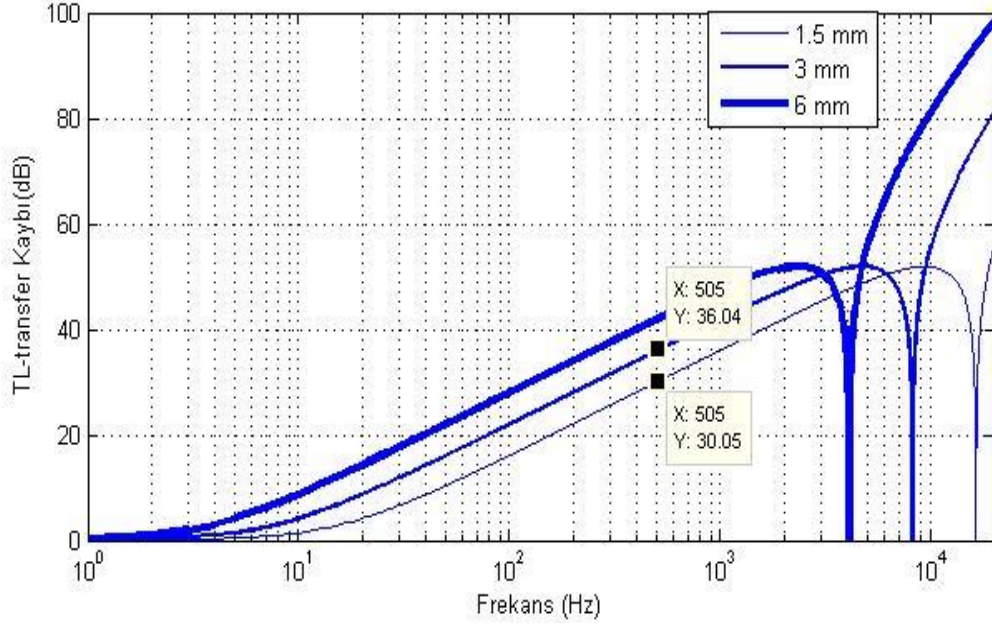
Literatürde kullanılan çelik katı katman özellikleri Çizelge 5.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. Literatürde Kullanılan Çelik katı katman malzeme özellikleri

| Malzeme Parametreleri | Çelik Katman |
|-----------------------|-------------------|
| Katman Kalınlığı (mm) | 1,5mm, 3mm ve 6mm |
| Yoğunluk (kg/m^3) | 7850 |
| Young modülü (GPa) | 210 |
| Poisson oranı | 0,3 |



Şekil 5.1. Literatür çalışmasında kullanılan 1.5mm, 3mm ve 6 mm çelik katı katman için ses transfer kaybı TL (dB) değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [3]



Şekil 5.2. Çelik katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 1.5 mm, 3 mm ve 6 mm çelik katı katman için ses transfer kaybı TL (dB) değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$

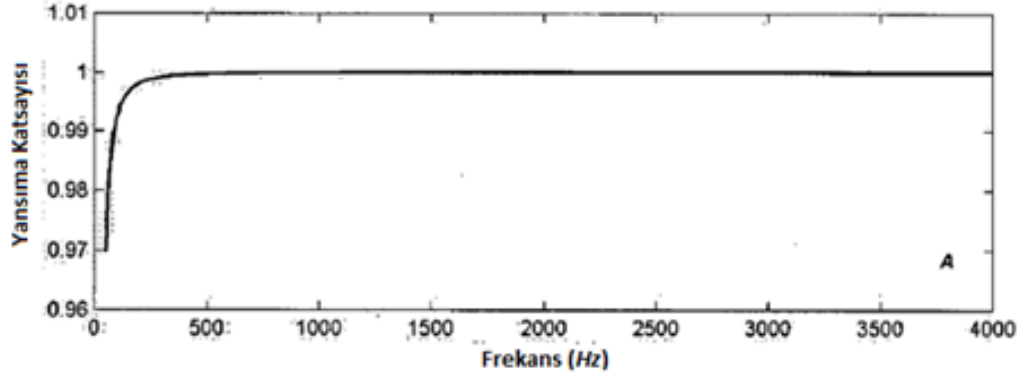
Şekil 5.1’de görüldüğü gibi literatür çalışmasında kullanılan çelik katman için 500 Hz frekans bandında, 1.5 mm katman kalınlığı ile 3 mm katman kalınlığı arasında 6 dB transfer kaybı farkı vardır ve 3 mm çelik katman daha iyi akustik yalıtım sağlamaktadır. Transfer Matris Metodu için yazılan MATLAB koduna aynı malzeme özellikleri girildiğinde de 500 Hz frekans bandında 6.01 dB transfer kaybı farkı gözlenmiştir. Şekil 5.2’deki sonuç, Transfer Matris Metot MATLAB kodunun ses analizinde katı katman için literatür çalışması ile aynı sonucu verdiğini göstermektedir.

İkinci olarak, akustik performans analizi cam katı katman için yapılmış ve ses yansımaya katsayıları, $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° ses dalgasının yüzeye geliş açılarına göre incelenmiştir. Wareing’in makalesinde de cam katı katman için benzer bir çalışma yapılmıştır [2]. Wareing’in çalışmasında 6 mm kalınlığında cam katmana, $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° açıları ile gelen ses dalgasının yansımaya katsayıları incelenmiştir [2]. Ses dalgası yansımaya katsayılarının incelendiği bu çalışmada, Şekil 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12 ve 5.14’te görüldüğü gibi literatür ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.

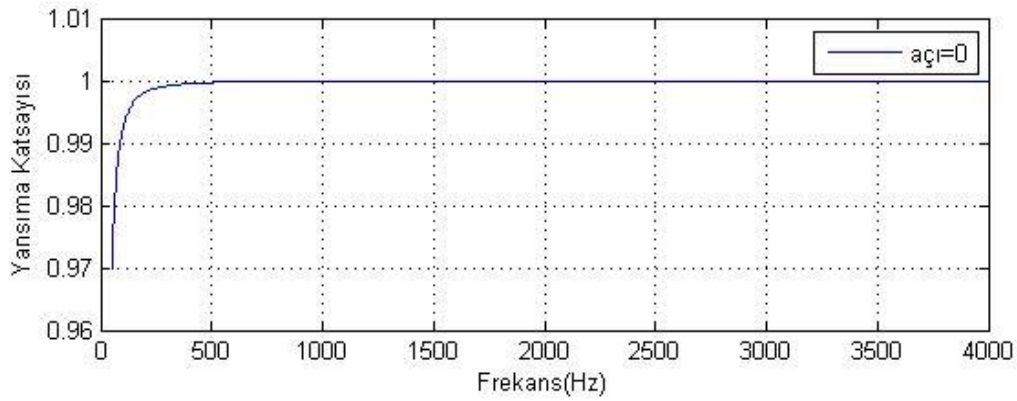
Literatür çalışmasında kullanılan cam katman özellikleri Çizelge 5.2’de belirtilmiştir [2].

Çizelge 5.2. Literatürde kullanılan cam katı katman malzeme özellikleri

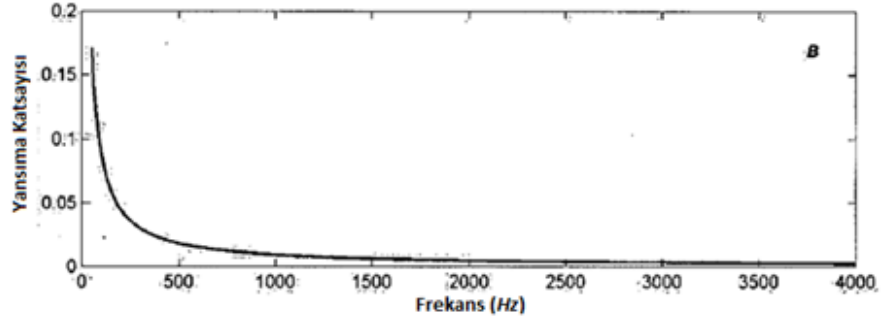
| Malzeme Parametreleri | Cam Katman |
|---------------------------|------------|
| Katman Kalınlığı (mm) | 6 |
| Yoğunluk (kg/m^3) | 2500 |
| Young modülü (GPa) | 60 |
| Poisson oranı | 0,33 |



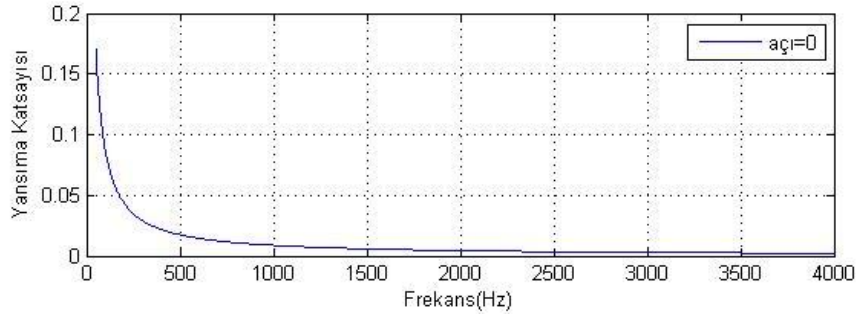
Şekil 5.3. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için gerçel kısım ses yansım kat sayı değerleri Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2]



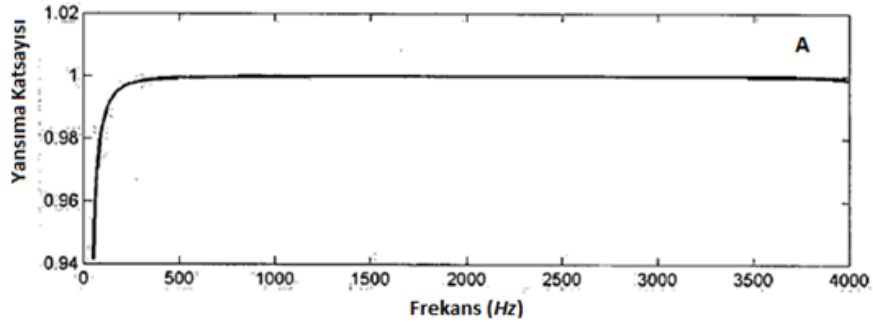
Şekil 5.4. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için gerçel kısım ses yansım katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$



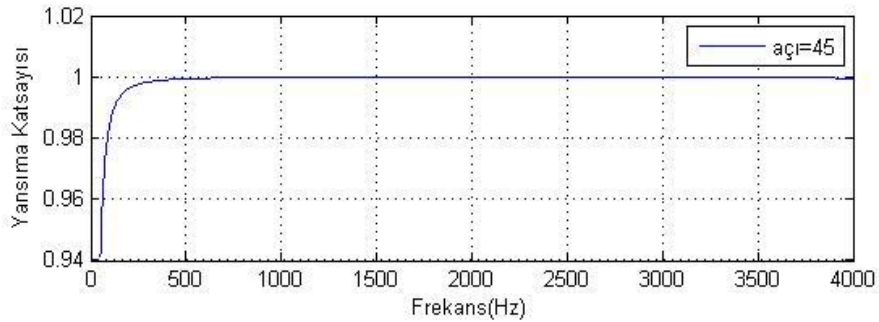
Şekil 5.5. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için sanal kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2]



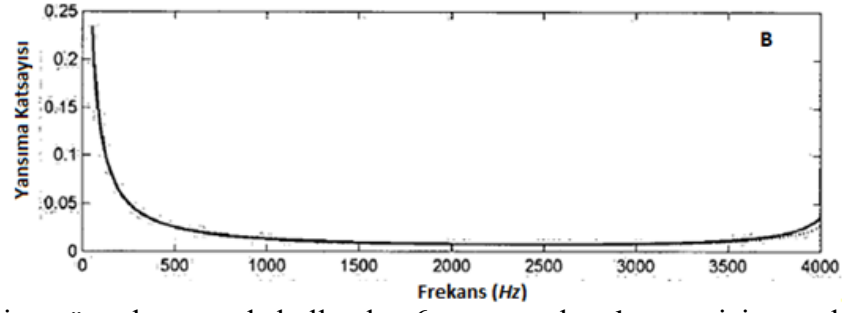
Şekil 5.6. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$



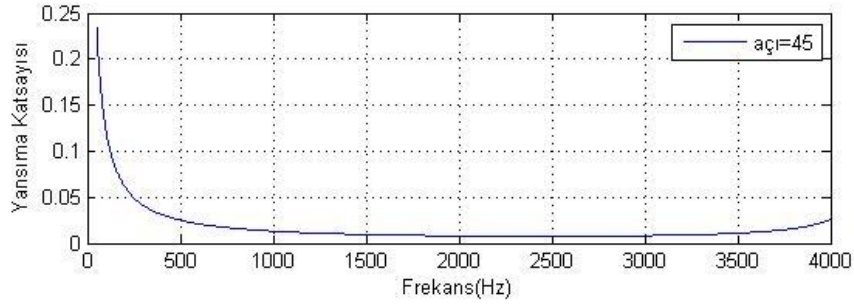
Şekil 5.7. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için gerçel kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2]



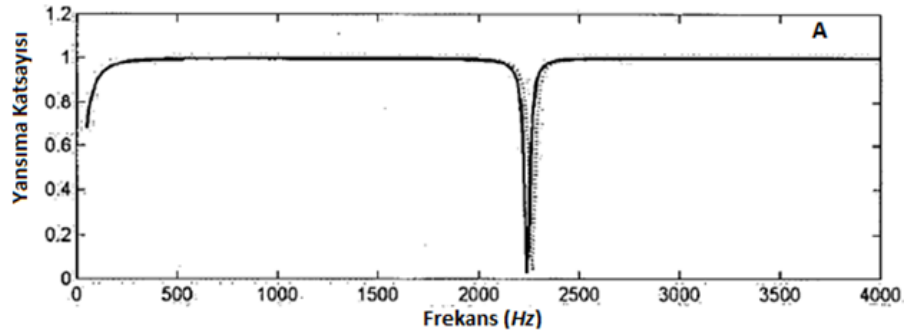
Şekil 5.8. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$



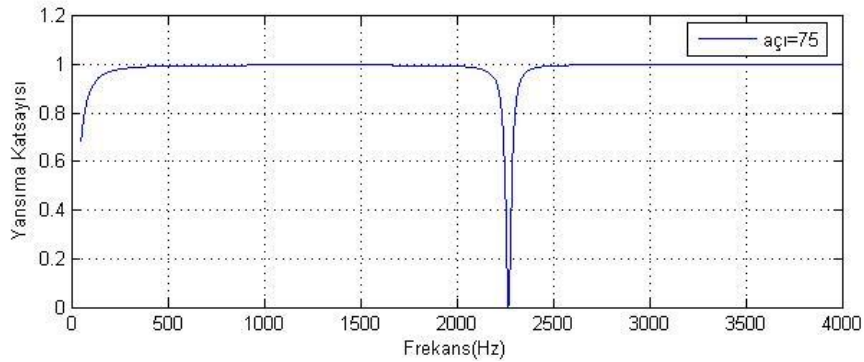
Şekil 5.9. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için sanal kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2]



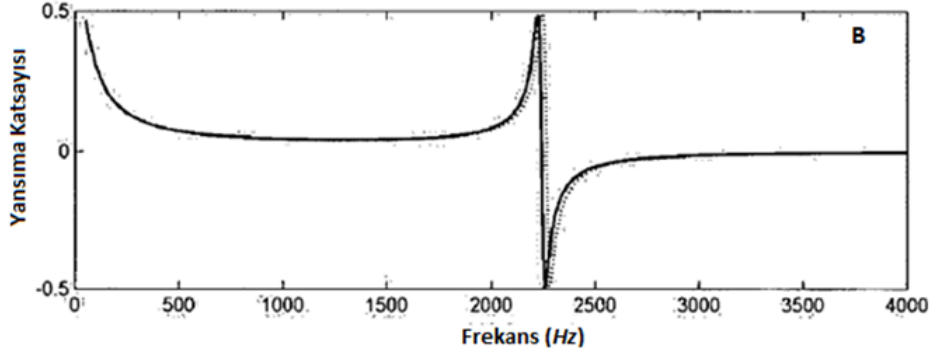
Şekil 5.10. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$



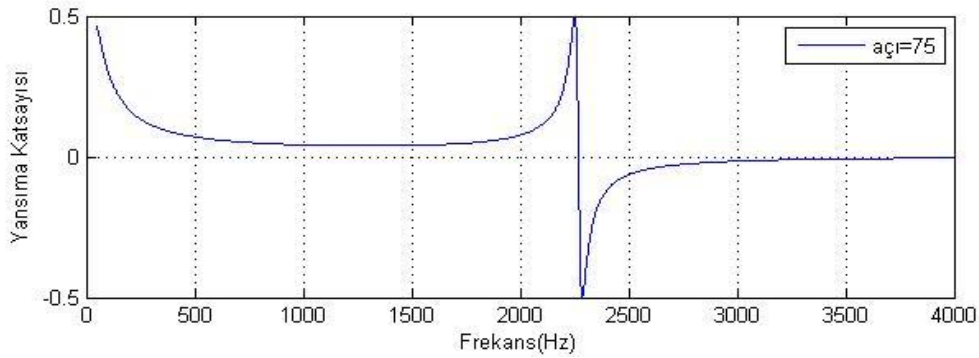
Şekil 5.11. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için gerçel kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2]



Şekil 5.12. . Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$



Şekil 5.13. Literatür çalışmasında kullanılan 6 mm cam katı katman için sanal kısım ses yansımaya kat sayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2]



Şekil 5.14. Cam katı katmanlı yapının akustik performans analizi: 6 mm cam katman için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$

Şekil 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 ve 5.13'te sırası ile $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° açıları ile cam katı katman yüzeyine gelen ses dalgası için literatür çalışmasında yapılan yansımaya katsayıları analizi görülmektedir. Şekil 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, 5.14'te ise Transfer Matris Metodu için yazılan MATLAB kodunun bu analizlere karşılık gelen sonuçları verilmiştir. Sonuçlar, MATLAB kodunun ses analizinde literatür çalışmalarıyla aynı sonuç verdiğini göstermektedir.

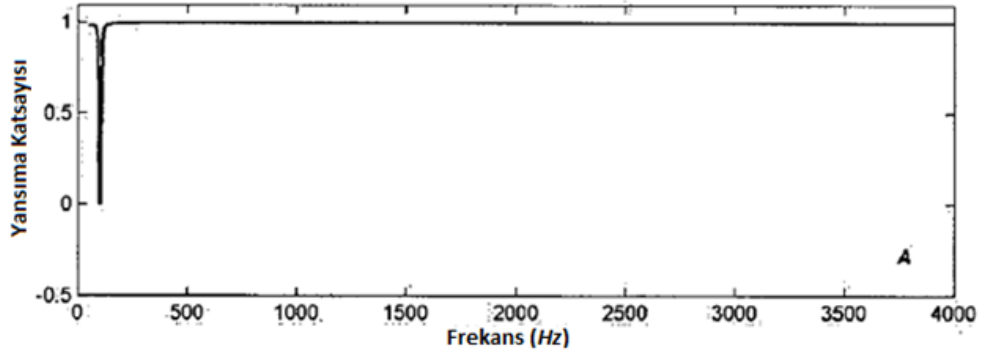
5.2. Literatürde Kullanılan Çok Katmanlı Yapıların Akustik Performans Analizleri

Bu bölümde, literatürde akustik performans analizi için kullanılan çok katmanlı yapıların akustik performansları incelenmiştir. İlk olarak, 12 mm kalınlığında iki alçıpan katı katman arasına 100 mm hava aralığı (sıvı katman) koyularak oluşturulmuş çok katmanlı yapıda ses dalgasının yansımaya katsayıları, $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° olan katman yüzeyine geliş açılarına göre analiz edilmiştir. Benzer çalışma Wareing'in makalesinde de yapılmıştır [2]. Ses dalgası yansımaya katsayılarının incelendiği bu çalışmada, Şekil 5.16, 5.18, 5.20, 5.22, 5.24 ve 5.26'da görüldüğü gibi literatür ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.

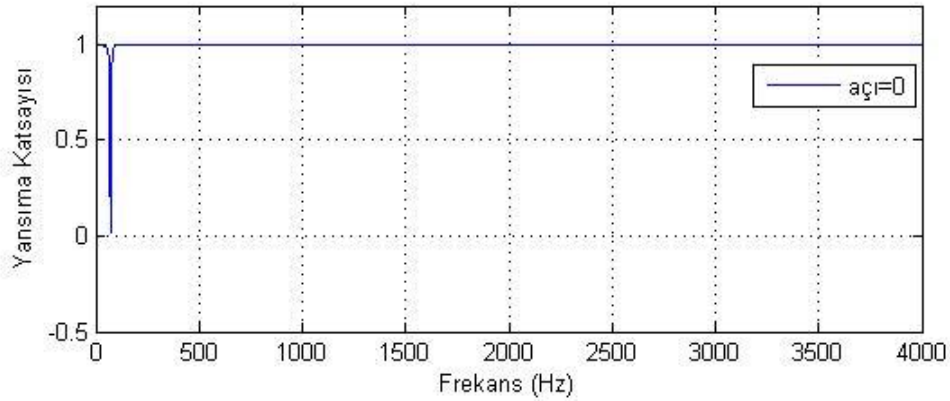
Kullanılan alçıpan katı katman ve hava katman özellikleri Çizelge 5.3'te belirtilmiştir [2].

Çizelge 5.3. Literatürde kullanılan alçıpan katmanı ve hava katmanı malzeme özellikleri

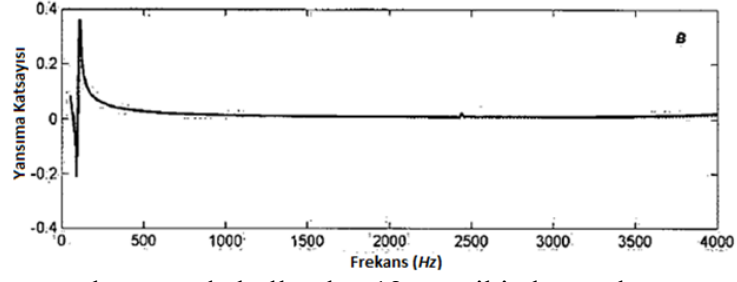
| Malzeme Parametreleri | Alçıpan Katman | Hava Katman |
|---------------------------|----------------|-------------|
| Katman Kalınlığı (mm) | 12 | 100 |
| Yoğunluk (kg/m^3) | 1200 | 1,2 |
| Ses hızı (m/s) | - | 344 |
| Young modülü (GPa) | 7 | - |
| Poisson oranı | 0,25 | - |



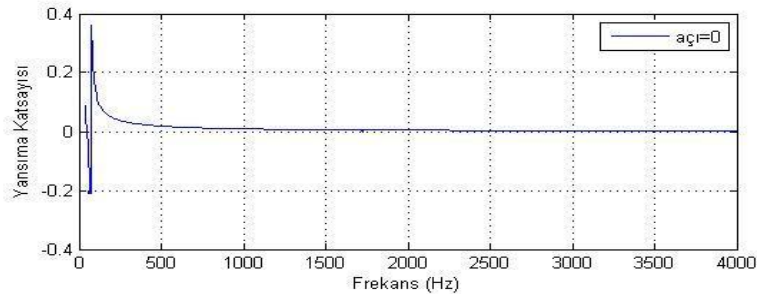
Şekil 5.15. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasında 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayıları değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2]



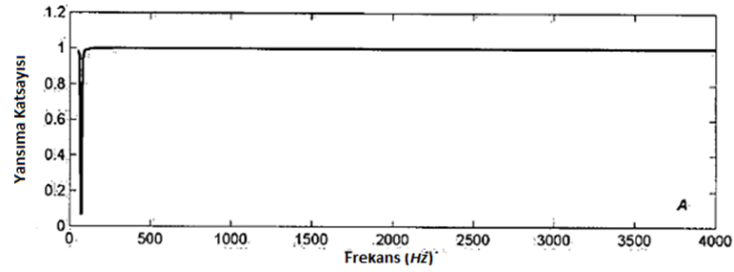
Şekil 5.16. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasında 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayıları değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$



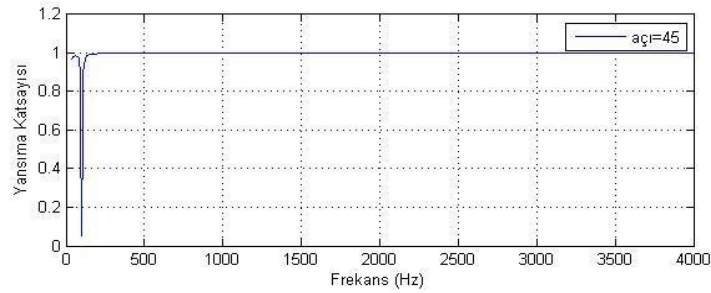
Şekil 5.17. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$ [2]



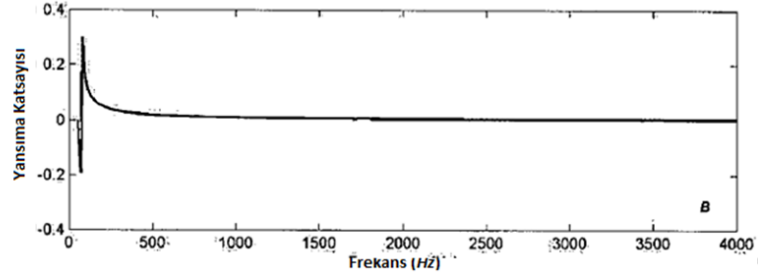
Şekil 5.18. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ$



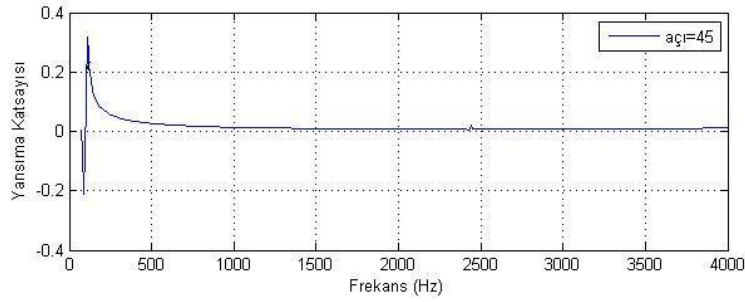
Şekil 5.19. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2]



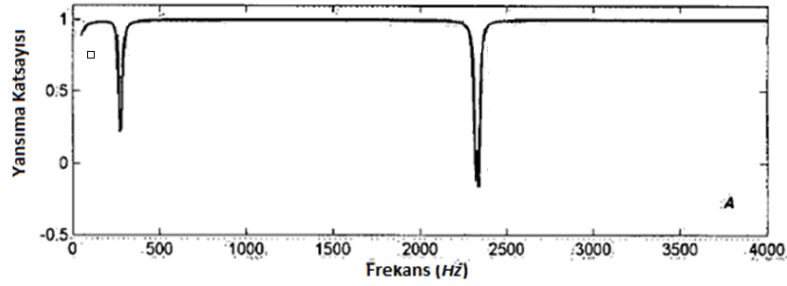
Şekil 5.20. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$



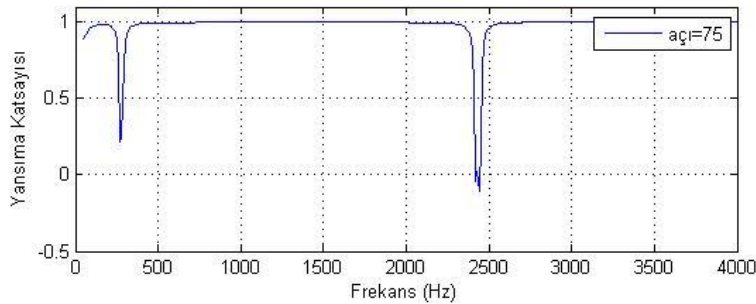
Şekil 5.21. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasında 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$ [2]



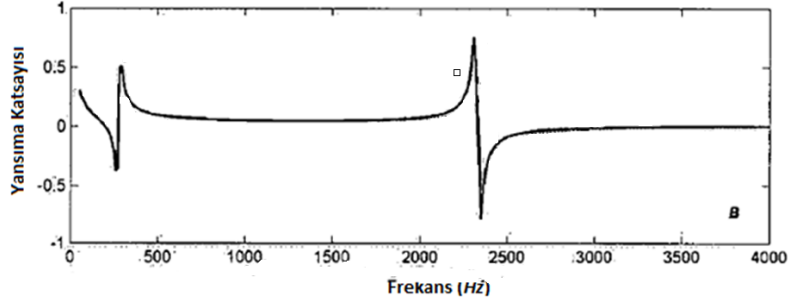
Şekil 5.22. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasında 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 45^\circ$



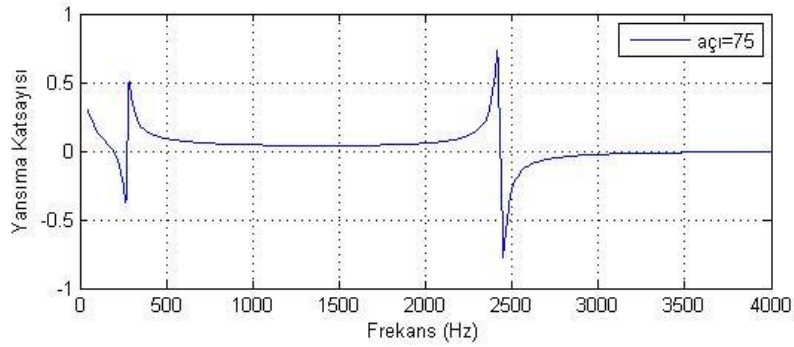
Şekil 5.23. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasında 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2]



Şekil 5.24. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasında 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$



Şekil 5.25. Literatür çalışmasında kullanılan 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansıma katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$ [2]



Şekil 5.26. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: 12 mm iki alçıpan katman arasına 100 mm hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansıma katsayı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 75^\circ$

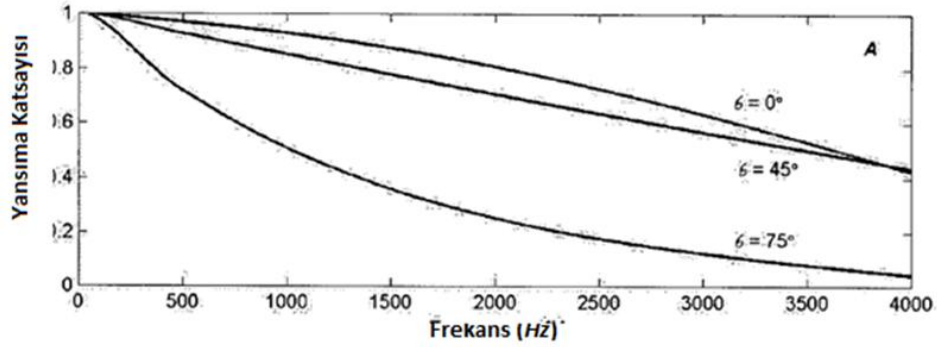
Şekil 5.15, 5.17, 5.19, 5.21, 5.23 ve 5.25'te sırası ile $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° açıları ile iki alçıpan katman arasına hava boşluğu bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı yüzeyine gelen ses dalgasının yansıma katsayısı analizi görülmektedir. Şekil Şekil 5.16, 5.18, 5.20, 5.22, 5.24 ve 5.26'da ise Transfer Matris Metot için yazılan MATLAB kodunun bu analizlere karşılık gelen sonuçları verilmiştir. Sonuçlar, MATLAB kodunun ses analizinde katı ve sıvı malzemelerden oluşan çok katmanlı yapılar için de literatür çalışmalarıyla aynı sonucu verdiğini göstermektedir.

Bir önceki çalışmada, çok katmanlı katı ve sıvı malzemeden oluşmuş yapılar için akustik performans analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, akustik performans analizi literatürde sıklıkla kullanılan çok katmanlı ve gözenekli malzemeden oluşmuş yapılar için de incelenecektir. Çok katmanlı gözenekli yapı olarak iki farklı halı malzemesi kullanılmıştır. İki farklı gözenekli halı katmanı, her biri 3.5 mm kalınlığında sıralanmış ve iki katmanlı gözenekli yapı oluşturulmuştur. Bu iki katmanlı gözenekli yapı yüzeyine $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° açıları ile gelen ses dalgasının yansıma katsayıları ve yüzey normal empedans (Z_A) değerleri elde edilmiştir. Benzer çalışma Wareing'in makalesinde de yapılmıştır [2].

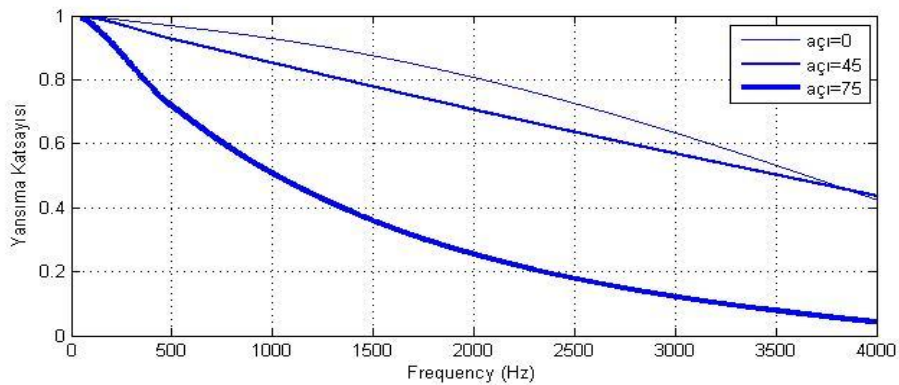
Kullanılan iki farklı gözenekli halı katmanının malzeme özellikleri Çizelge 5.4'te belirtilmiştir [2].

Çizelge 5.4. Literatürde kullanılan iki farklı halı gözenekli katman malzeme özellikleri

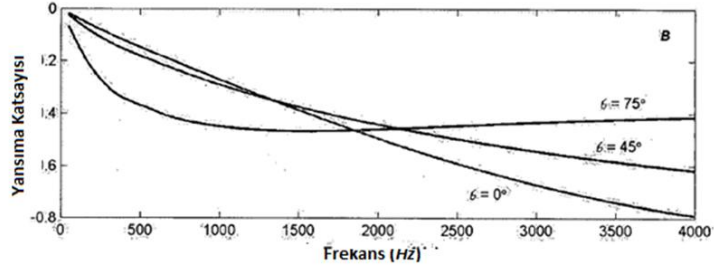
| Malzeme Parametreleri | Gözenekli Halı Katman | Gözenekli Halı Katman |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Katman Kalınlığı (mm) | 3,5 | 3,5 |
| Yoğunluk (kg/m^3) | 60 | 60 |
| Shear modülü (MPa) | $(10+5i).10^{-3}$ | $(10+5i).10^{-3}$ |
| Poisson oranı | 0 | 0 |
| Hava Akış Direnci ($kg/m^3.s$) | 20000 | 5000 |
| Bükümlülük | 0,99 | 0,99 |
| Gözeneklilik | 1 | 1 |
| Viskozite Boyutu (m) | $1,5.10^{-4}$ | $2,3.10^{-4}$ |
| Termal Boyutu (m) | $2,2.10^{-4}$ | $2,8.10^{-4}$ |



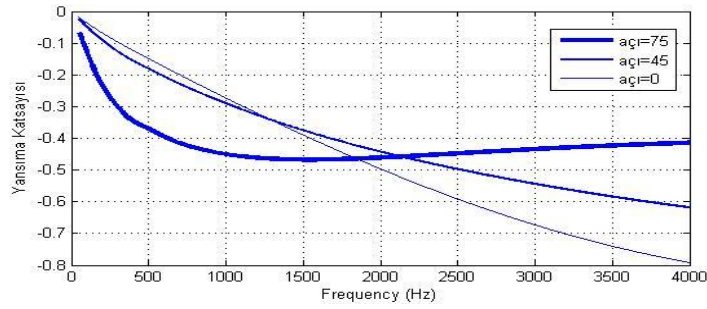
Şekil 5.27. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayısı. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2]



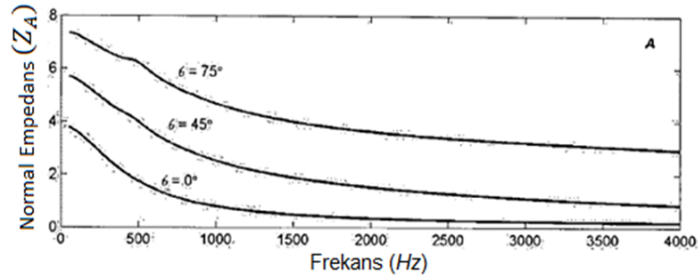
Şekil 5.28. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapı için gerçel kısım ses yansımaya katsayısı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° , ses dalgasının yüzeye geliş açısı



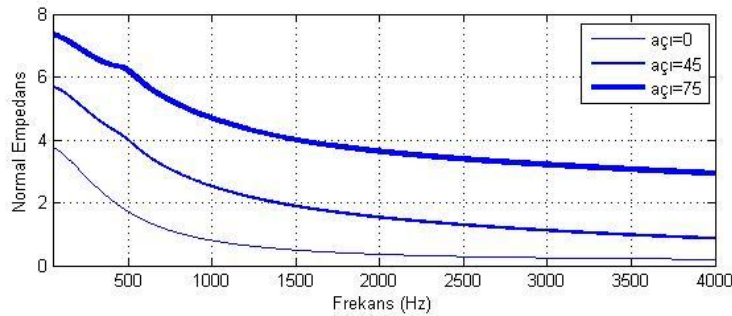
Şekil 5.29. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayısı. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2]



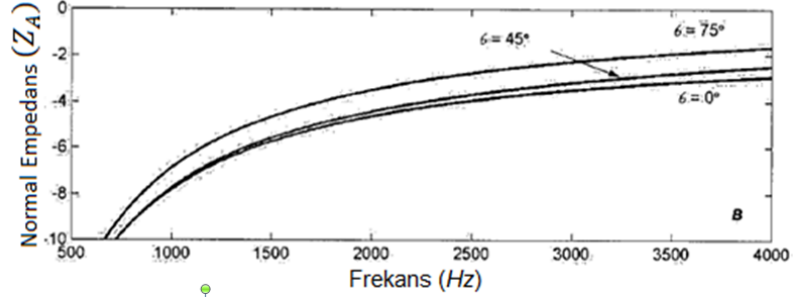
Şekil 5.30. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapı için sanal kısım ses yansımaya katsayısı değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° , ses dalgasının yüzeye geliş açısı



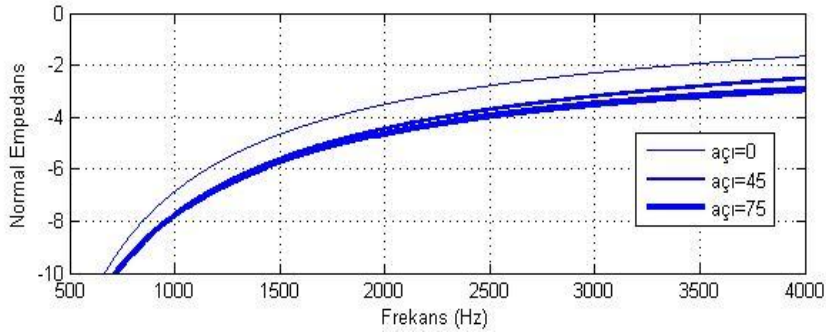
Şekil 5.31. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapının gerçel kısım normal yüzey empedansı (Z_A). Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2]



Şekil 5.32. Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapının gerçel kısım normal yüzey empedansı (Z_A) değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75°



Şekil 5.33. Literatür çalışmasında kullanılan her biri 3.5 mm iki halı katmanından oluşmuş çok katmanlı yapının sanal kısım normal yüzey empedansı (Z_A). Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75° [2]



Şekil 5.34 Çok katmanlı yapının akustik performans analizi: her biri 3.5 mm olan iki halı katmandan oluşturulmuş çok katmanlı yapının sanal kısım normal yüzey empedansı (Z_A) değerleri. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 75°

Şekil 5.28, 5.30, 5.32 ve 5.34 Transfer Matris Metot için yazılan MATLAB kodunun bu literatür analizlerine karşılık gelen sonuçları verilmiştir. Sonuçlar, MATLAB kodunun ses analizinde gözenekli malzemelerden oluşan çok katmanlı yapılar için de literatür ile aynı sonucu verdiğini göstermektedir.

Literatürde, katı çelik katman, katı cam katman katı yapıda iki alçıpan katman arasına sıvı katman (hava boşluğu) bırakılarak oluşturulmuş çok katmanlı yapı ve gözenekli iki farklı halı malzemesi ile oluşturulmuş çok katmanlı yapıların akustik performansları analiz edilmiştir. Bu çalışmalarda, ses iletim kaybı, ses yansıma katsayıları ve malzeme normal empedans değerleri analiz edilmiş ve çıktı olarak elde edilen sonuçlar ilgili çalışmalardan alınmıştır. Literatür çalışmaları analiz sonuçları, tez çalışması için yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB kodu sonuçları ile karşılaştırılmış ve yazılan kodun literatür ile aynı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece, yapıda kullanılan malzeme özellikleri iyi bilindiği takdirde, bu tez çalışması için yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB kodunun akustik analizde doğru sonuç verdiğini doğrulanmıştır.

6. ÇOK KATMANLI YENİ YAPILARIN AKUSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ

Bu bölümde, literatürde mevcut olmayan yeni çok katmanlı yapılar tasarlanmış ve akustik performansları incelenmiştir. Yeni tasarlanan çok katmanlı yapılar periyodik ve ya Fibonnaci Serisi dizilimine göre sıralanmış ve farklı dizilimler oluşturulmuştur. Sonrasında tasarlanan bu yapıların akustik performansları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yapılar sonlu kalınlıkta ve sonsuz boyutta olarak değerlendirilmiştir. Ses dalgasının yüzeye geliş açısı normal ($\theta = 0^\circ$), olarak alınmıştır. Ses yalıtım performansını karşılaştırmak adına transfer kayıpları (TL) MATLAB programı kullanılarak desibel düzeyinde (dB) analiz edilmiş ve akustik performansları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Transfer Matris Metodu ile akustik performans karşılaştırmada kullanılan çok katmanlı yapı modelleri aşağıda belirtilmiştir.

1. Eş kalınlıkta iki katmanlı yapı ile çok katmanlı periyodik dizilimli yapının akustik performansı analiz edilmiştir.
2. Farklı Fibonacci Serisi dizilimli eş katman kalınlığına sahip gözenekli yapıların akustik performansı analiz edilmiştir.
3. Farklı Fibonacci Serisi dizilimli eş katman kalınlığı ve katman sayısına sahip gözenekli yapıların akustik performansı analiz edilmiştir.

6.1. Eş kalınlıkta İki Katmanlı Yapı ile Çok Katmanlı Periyodik Dizilimli Yapının Akustik Performans Analizi

6.1.1. Gözenekli İki Katmanlı Yapı ile Gözenekli Çok Katmanlı Yapının Akustik Performanslarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada, gözenekli akustik halı malzemesi ile oluşturulmuş iki katmanlı yapı “AB” ile her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde bu iki katmanın beş kez tekrarlanması ile oluşturulmuş çok katmanlı “ABABABAB” dizilimli yapının akustik performansı karşılaştırılmıştır. Çok katmanlı yapının, iki katmanlı yapı ile aynı kalınlıkta olması için, iki katmanlı yapıdaki her bir “A” ve “B” katman kalınlığı beş kat azaltılmıştır. Transfer kayıpları, Transfer Matris Metodu ile elde edilmiş ve aynı kalınlıkta iki katmanlı yapı ile çok katmanlı yapının ses yalıtım performansı değerlendirilmiştir.

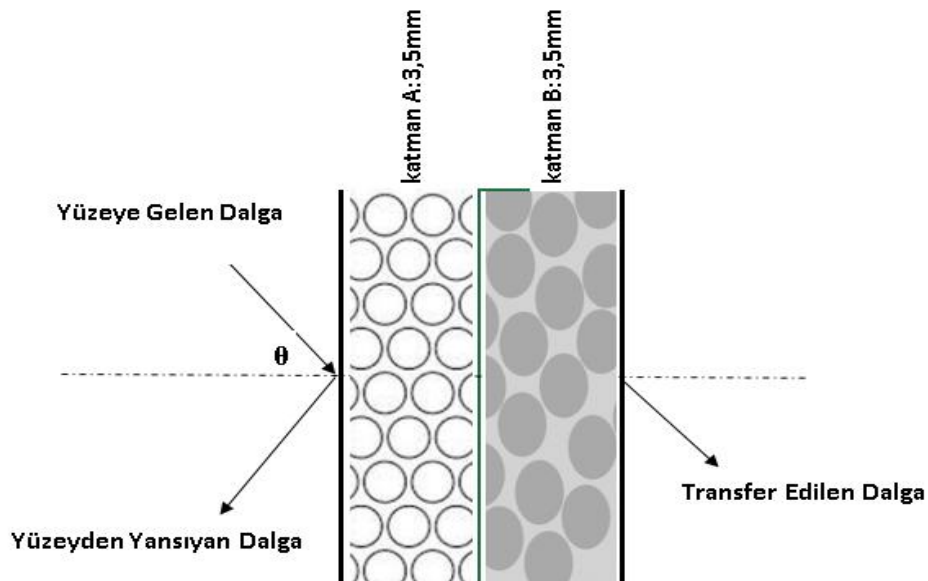
Test edilecek olan iki farklı gözenekli akustik halı malzemeleri literatürde sıklıkla kullanılan malzemeler olup, özellikleri Çizelge 6.1’de belirtilmiştir [2]. İki farklı gözenekli akustik halı malzemesi Katman A ve Katman B olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. İki farklı gözenekli akustik halı katmanı malzeme özellikleri

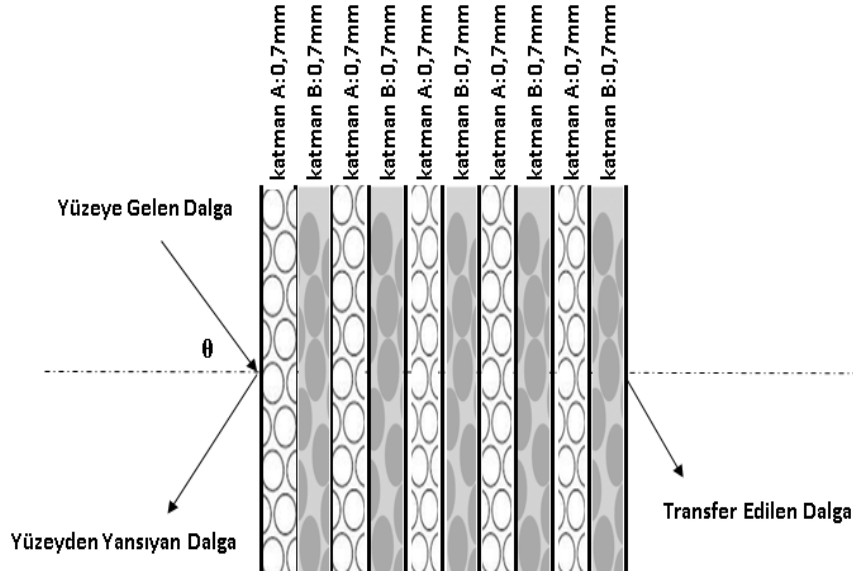
| Malzeme Parametreleri | Katman A:Gözenekli Halı Katman | Katman B:Gözenekli Halı Katman |
|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Katman Kalınlığı (<i>mm</i>) | 3,5 | 3,5 |
| Yoğunluk (<i>kg/m³</i>) | 130 | 60 |
| Shear modülü (<i>MPa</i>) | $(2200+i).10^{-5}$ | $(10+5i).10^{-3}$ |
| Poisson oranı | 0 | 0 |
| Hava Akış Direnci (<i>kg/m³.s</i>) | 40000 | 5000 |
| Bükümlülük (Porosity) | 0,94 | 0,99 |
| Gözeneklilik (Tortuosity) | 1,06 | 1 |
| Viskozite Boyutu (m) | $0,56.10^{-4}$ | $2,3.10^{-4}$ |
| Termal Boyutu (m) | $1,12.10^{-4}$ | $2.8.10^{-4}$ |

“AB” iki katmanlı gözenekli yapı, 3.5 *mm* A katman kalınlığı ve 3.5 *mm* B Katman kalınlığı olacak şekilde toplamda 7 *mm* katman kalınlığı ile elde edilmiştir. Her bir katmanın toplam kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde A katmanı ve B katmanı beş eşit parçaya bölünerek çok katmanlı yapı elde edilir. Bu yapıda, 0.7 *mm* kalınlığında 5 adet A katmanı ve 0.7 *mm* kalınlığında 5 adet B katmanı (toplamda 10 katman) bulunmaktadır. Elde edilen bu katmanlar “ABABABABAB” dizilimli olarak sıralanmıştır. Böylece iki katmanlı yapı aynı malzeme kullanılarak ve her bir katmanın kalınlığı aynı kalacak şekilde on katmanlı yapıya dönüştürülmüştür.

Şekil 6.1 iki katmanlı yapının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini göstermektedir. Şekil 6.2 ise iki katmanlı yapıdan çok katmanlı yapı elde edilmesi ile oluşan yeni yapının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini ifade etmektedir.



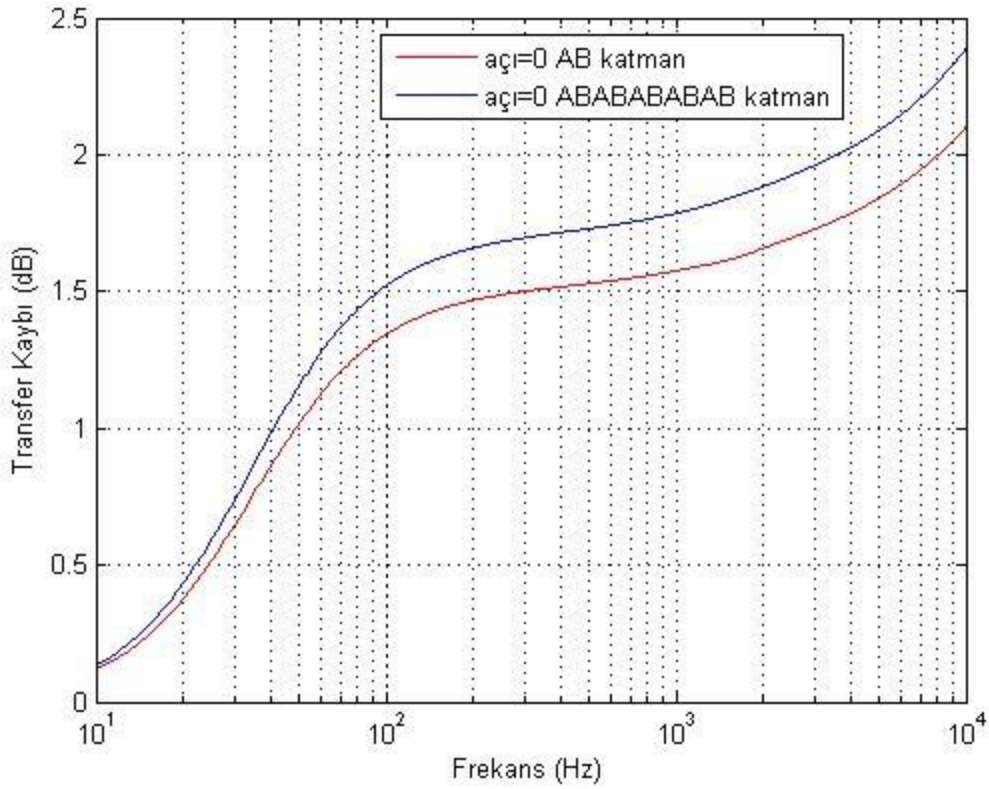
Şekil 6.1. İki katmanlı gözenekli “AB” yapısı. 3.5 *mm* A katman kalınlığı ve 3.5 *mm* B katman kalınlığı olmak üzere toplam kalınlığı 7 *mm* olan yapı



Şekil 6.2. Çok katmanlı gözenekli “ABABABABAB” yapısı. Her bir A katman kalınlığı $0,7 \text{ mm}$ ve her bir B katman kalınlığı $0,7 \text{ mm}$ olmak üzere toplam kalınlığı 7 mm olan 10 katmanlı yapı

Şekil 6.1 ile gösterilen iki katmanlı yapı ile Şekil 6.2 ile gösterilen çok katmanlı yapının akustik performans analizleri, transfer kayıpları (TL) göz önüne alınarak dB seviyesinde yapılmış ve Şekil 6.3’te karşılaştırılmıştır. Böylece malzeme özellikleri ve her bir katmanın toplam kalınlığı değişmezken, katman sayısının artırılmasının akustik performansa etkisi incelenmiştir.

Transfer kaybının fazla olması yapının daha iyi akustik yalıtım sağladığı anlamına gelmektedir. Buna göre, aynı akustik malzemelerin aynı toplam kalınlıkta kullanılması ile iki katmanlı yapı Şekil 6.1 ve çok katmanlı yapı (10 katmanlı) Şekil 6.2 ile 10 Hz ve 10000 Hz frekans bandında yapılan ses transfer kaybı analizinde, çok katmanlı yapının tüm frekanslarda iki katmanlı yapıya göre daha fazla emilim sağladığı ve ses yalıtımının daha iyi olduğu görülmektedir. Çalışmada, frekans arttıkça, iki katmanlı yapı ile çok katmanlı yapı arasında ses transfer kaybı farkının (dB) daha da arttığı gözlenmiştir.



Şekil 6.3. iki katmanlı gözenekli “AB” yapısı ile her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde oluşturulan çok katmanlı gözenekli “ABABABABAB” yapısı ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması

6.1.2. Aralarında Hava Boşluğu Bulunan Katı İki Katmanlı Yapı ile Katı Çok Katmanlı Yapının Akustik Performanslarının Karşılaştırılması

İkinci çalışmada, literatürde akustik yalıtımda sıklıkla kullanılan alçıpan katman ve hava boşluğu ile yapı modellemesi yapılmıştır [2]. İki katı alçıpan katman arasına sıvı katman (hava boşluğu) bırakılarak elde edilen katmanlı yapı “CDC” (C: alçıpan malzeme, D: hava boşluğu) ile her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde, bu iki katmanın üç kez tekrarlanması ile oluşturulmuş çok katmanlı yapının “CDCCDCDC” akustik performansı karşılaştırılmıştır. Çok katmanlı yapının, iki katmanlı yapı ile aynı kalınlıkta olması için, iki katmanlı yapıdaki her bir “C” ve “D” katman kalınlığı üç kat azaltılmıştır. Alçıpan katmanı arasında hava boşluğunun bırakılmasının nedeni havanın viskozite özelliğidir. Viskozite özeliği ile, ses enerjisi, gözeneklerin çeperlerinde meydana gelen sürtünmelerle ısıya dönüşür. Viskoz etkilerin dışında meydana gelen ısının iletimi sebebiyle de ses kayıpları meydana gelir. Ses emiliminin etkili olabilmesi için sesin geçtiği yapının içerisinde birbirine bağlı hava kanalları bulunmalıdır. Bu ses transfer kayıpları, Transfer Matris Metodu ile elde edilmiş ve aynı kalınlıkta iki katmanlı yapı ile çok katmanlı yapının ses yalıtım performansı değerlendirilmiştir.

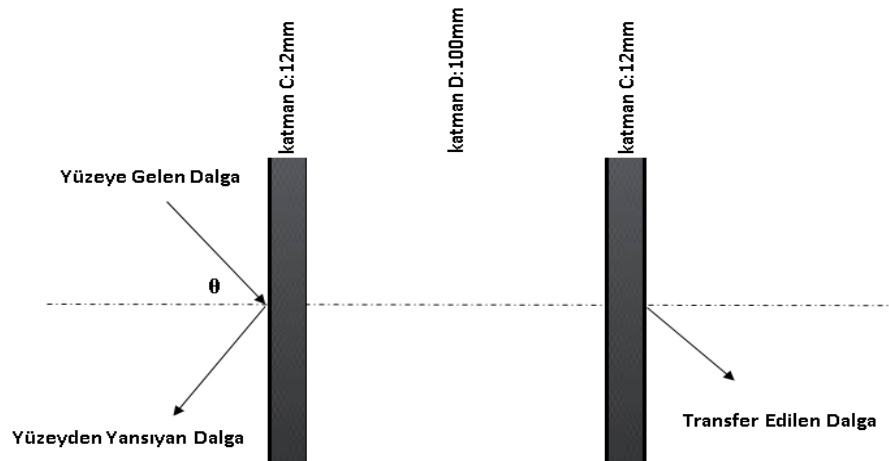
Test edilen katı alçıpan katmanın ve hava katmanın özellikleri Çizelge 6.2’de belirtilmiştir. Katı alçıpan katmanı Katman C ve hava boşluğu ise Katman D olarak belirtilmiştir.

Çizelge 6.2. Katı Alçıpan Katman ve Hava Boşluğu malzeme özellikleri

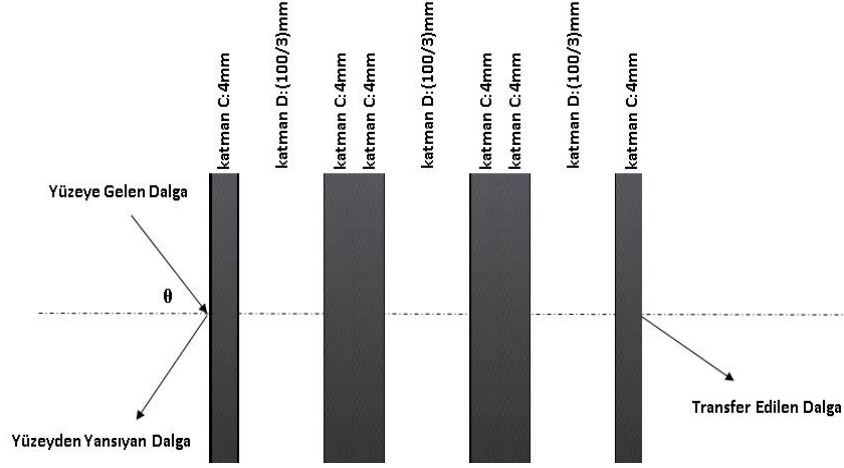
| Malzeme Parametreleri | Katman C: Katı Alçıpan Katman | Katman D: Hava Katman |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Katman Kalınlığı (<i>mm</i>) | 24 | 100 |
| Yoğunluk (<i>kg/m³</i>) | 1200 | 1,2 |
| Ses hızı (<i>m/s</i>) | - | 344 |
| Young modülü (<i>GPa</i>) | 7 | - |
| Poisson oranı | 0,25 | - |

12 *mm* kalınlığında iki alçıpan katman arasında 100 *mm* hava boşluğu bırakılarak, toplamda 124 *mm* kalınlığında “CDC” (D hava boşluğu) yapısı elde edilmiştir. Aralarında hava boşluğu bulunan bu iki katmanlı yapı ile çok katmanlı yapı arasındaki ses yalıtım performansının karşılaştırılması ve analizi için C katmanı ve D hava katmanı üçer eşit parçaya bölünmüştür. 4 *mm* kalınlığında altı adet C alçıpan katmanı ile 33,33 *mm* üç adet D hava katmanı olmak üzere toplamda 9 katmanlı yapı elde edilmiştir. Elde edilen bu katmanlar “CDCCDCCDC” dizilimli olarak sıralanmıştır.

Şekil 6.4 iki alçıpan katman arasına hava aralığı konularak oluşturulmuş iki katmanlı yapının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini göstermektedir. Şekil 6.5 ise iki katmanlı yapıdan çok katmanlı yapı elde edilmesi ile oluşan yeni yapının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini ifade etmektedir.



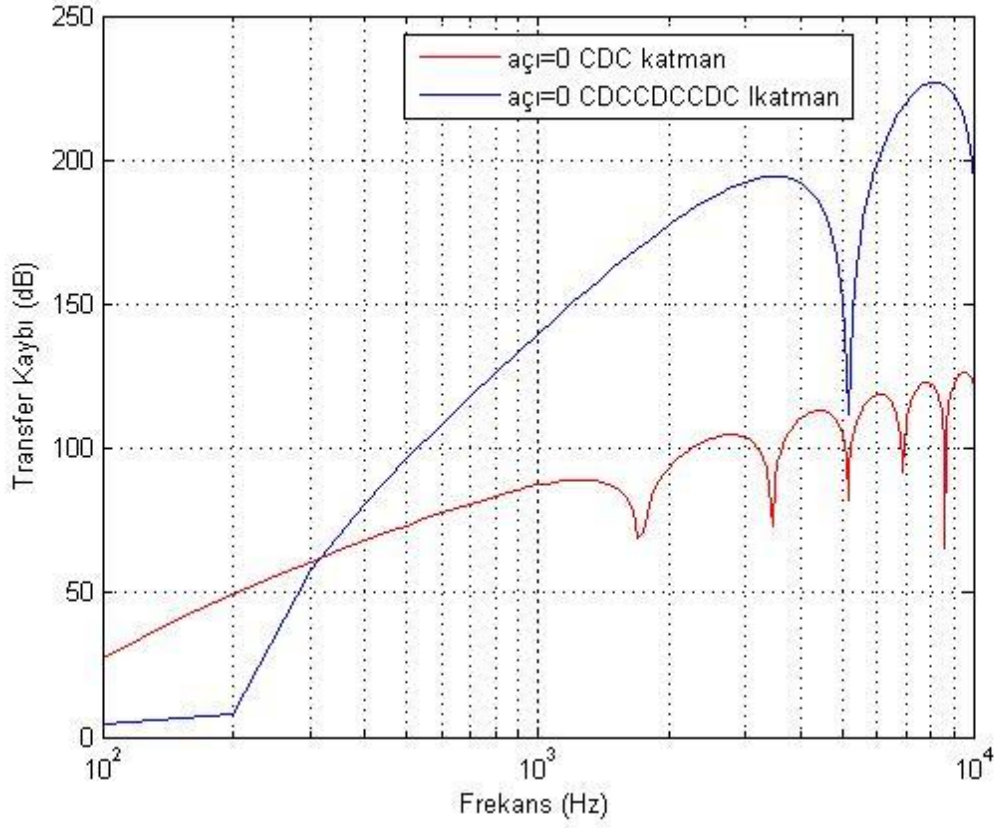
Şekil 6.4. Katmanlı “CDC” yapısı. Her biri 12 *mm* C katman kalınlığı ve 100 *mm* D katman kalınlığı olmak üzere toplam kalınlığı 124 *mm* olan yapı.



Şekil 6.5. Çok katmanlı “CDCCDCCDC” yapısı. Her bir “C katman kalınlığı 4 mm ve her bir D katman kalınlığı 33.33 mm olmak üzere toplam kalınlığı 124mm olan 9 katmanlı yapı

Şekil 6.4’te gösterilen aralarında hava boşluğu bulunan iki katmanlı yapı ile Şekil 6.5’te gösterilen çok katmanlı yapının akustik performans analizleri, transfer kayıpları (TL) göz önüne alınarak dB seviyesinde yapılmış ve Şekil 6.6’da karşılaştırılmıştır. Böylece malzeme özellikleri ve her bir katmanın toplam kalınlığı değişmezken, katman sayısının artırılmasının ve aynı zamanda katmanlar arasında hava boşluğu bırakılmasının akustik performansa etkisi incelenmiştir.

Transfer kaybını fazla olması yapının daha iyi akustik yalıtım sağladığı anlamına gelmektedir. Karşılaştırma sonuçlarına göre, aynı akustik malzemelerin aynı toplam kalınlıkta kullanılması ile aralarında hava boşluğu bırakılarak oluşturulan iki katmanlı yapı Şekil 6.3 ve çok katmanlı yapı (9 katmanlı) Şekil 6.4 ile 100 Hz ve 10000 Hz frekans bandında yapılan ses transfer kaybı analizinde, çok katmanlı yapının 300 Hz sonrasında çok daha fazla emilim sağladığı ve ses yalıtımının daha iyi olduğu görülmektedir. Çalışmada, frekans arttıkça iki katmanlı yapı ile çok katmanlı yapı arasında ses transfer kaybı farkının (dB) daha da arttığı gözlenmiştir.



Şekil 6.6. Katı alçıpan-hava “CDC” yapısı ile, her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde oluşturulan çok katmanlı “CDCCDCCDC” yapısı ses transfer kayıplarının (*TL*) *dB* seviyesinde karşılaştırılması

6.2. Fibonacci Serilerine Göre Sıralanmış Çok Katmanlı Yapıların Akustik Performans Analizleri

6.2.1. Fibonacci Serileri

Fibonacci Serisi dizilimi, her sayının kendinden önceki sayı ile toplanması sonucu oluşan bir sayı dizisidir. Fibonacci Serisi diziliminde, her terimin bir önceki terime oranı Altın Oranı verir ve bu sayının yaklaşık değeri 1,618 dir.

Akustik analiz çalışmalarına başlamadan önce, Çizelge 6.3’te yapı katmanlarının Fibonacci Serisi dizilimin farklı kuşaklarına göre nasıl sıralandığı ve bu kuşaklara ait katman sayısı gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Fibonacci Serisinin diziliminin farklı kuşaklarına ait katman sayıları ve katman sıralamaları

| Fibonacci Serisi Kuşakları | Katman Sayısı | Katman Sıralaması |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 0 | 1 | B |
| 1 | 1 | A |
| 2 | 2 | AB |
| 3 | 3 | ABA |
| 4 | 5 | ABAAB |
| 5 | 8 | ABAABABA |
| 6 | 13 | ABAABABAABAAB |
| 7 | 21 | ABAABABAABAABABAABAABABA |

6.2.2. Farklı Fibonacci Serisi Dizilimli Eş Katman Kalınlığına Sahip Gözenekli Yapıların Akustik Performans Analizleri

Bu bölümde, iki farklı gözenekli akustik halı malzemesi ile oluşturulmuş iki katmanlı yapı “EF” ile her bir katman toplam kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan çok katmanlı yapıların akustik performansı karşılaştırılmıştır. Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre dizilimi Çizelge 6.3’te gösterilmiştir.

İki katmanlı yapı ile toplam yapı kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan çok katmanlı yapıların transfer kayıpları, Transfer Matris Metodu ile elde edilmiştir. Aynı kalınlıkta iki katmanlı yapı ile Fibonacci Serisi dizilimine göre çok katmanlı olarak sıralanmış yapının ses yalıtım performansları transfer kayıpları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Böylece özel dizilim olan Fibonacci Serisi diziliminin akustik performansa etkisi incelenmiştir.

Test edilen iki farklı gözenekli akustik halı malzemenin özellikleri Çizelge 6.4’te belirtilmiştir. İki farklı gözenekli akustik halı malzemesi Katman E ve Katman F olarak verilmektedir.

Çizelge 6.4. İki farklı akustik halı malzemesi katman E ve katman F malzeme özellikleri

| Malzeme Parametreleri | Katman E:Gözenekli Halı Katman | Katman F:Gözenekli Halı Katman |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Katman Kalınlığı (<i>mm</i>) | 90 | 90 |
| Yoğunluk (<i>kg/m³</i>) | 59 | 130 |
| Shear modülü (<i>MPa</i>) | $(125+6,2i).10^{-3}$ | 220+22i |
| Poisson oranı | 0,3 | 0,3 |
| Hava Akış Direnci (<i>kg/m³.s</i>) | 130000 | 40000 |
| Bükümlülük (Porosity) | 0,98 | 0,94 |
| Gözeneklilik (Tortuosity) | 1,04 | 1,06 |
| Viskozite Boyutu (m) | 10^{-5} | $0,56.10^{-4}$ |
| Termal Boyutu (m) | 10^{-4} | $1,1.10^{-4}$ |

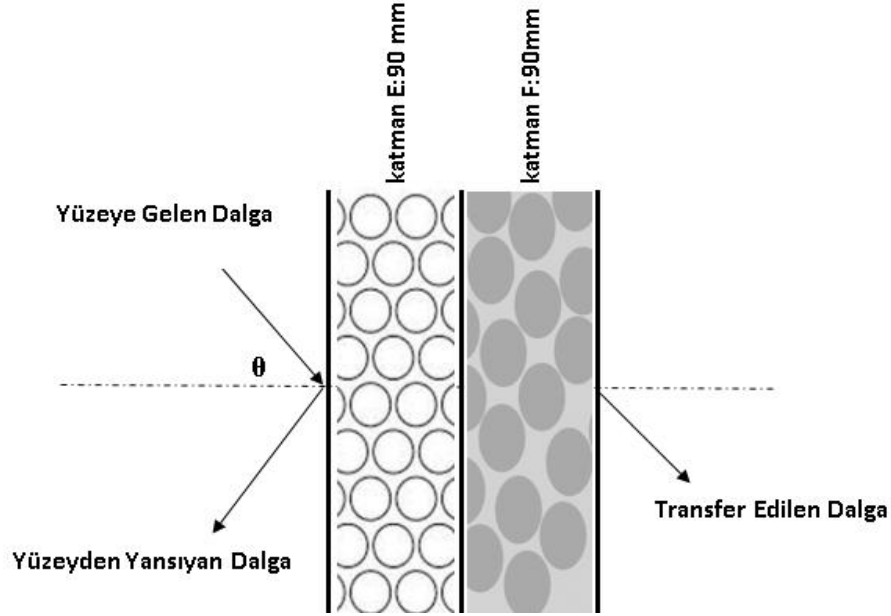
“EF” iki katmanlı gözenekli yapı, 90 *mm* E katman kalınlığı ve 90 *mm* F Katman kalınlığı olacak şekilde toplamda 180 *mm* katman kalınlığı ile elde edilmiştir. Bu iki katmanlı yapı, her bir katmanın toplam kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı kalacak şekilde Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanarak çok katmanlı yapıya dönüştürülmüştür.

Çizelge 6.5, Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşakları için E ve F katmanlarının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini göstermektedir. Fibonacci Serisi diziliminin her kuşağı için toplam E katmanı 90 *mm* ve toplam F katmanı 90 *mm* olarak, katman kalınlıkları değişmeyecek şekilde ayarlanmıştır.

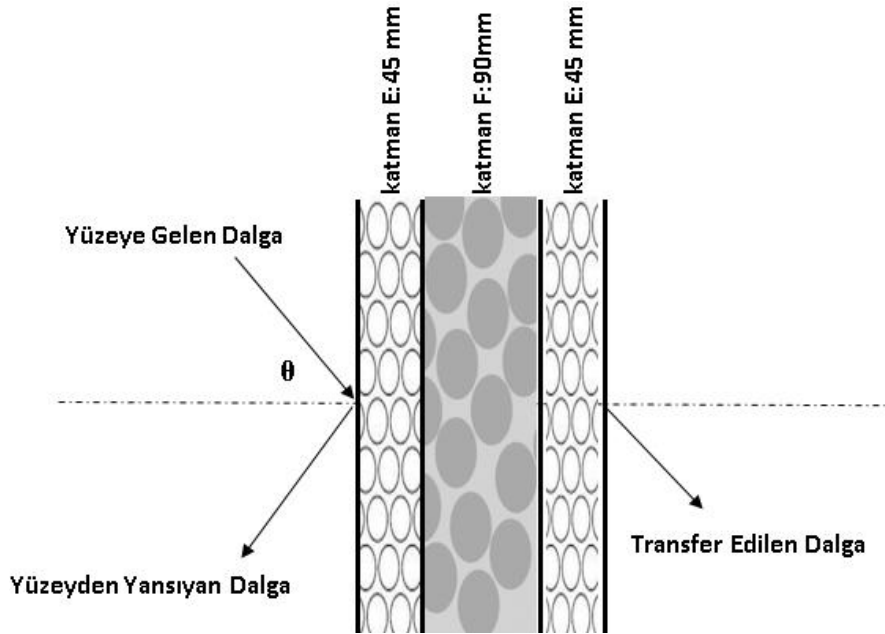
Çizelge 6.5. Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşakları için E ve F katmanları toplam katman sayısı, katman sıralaması ve katman kalınlıkları

| Fibonacci Serisi Kuşakları | Katman Sayısı | Katman Sıralaması | E ve F Katman Kalınlıkları (<i>mm</i>) |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------|---|
| 0 | 1 | F | F katman kalınlığı: 90 <i>mm</i> |
| 1 | 1 | E | E katman kalınlığı: 90 <i>mm</i> |
| 2 | 2 | EF | E katman kalınlığı: 90 <i>mm</i> F katman kalınlığı: 90 <i>mm</i> |
| 3 | 3 | EFE | E katman kalınlığı: 45 <i>mm</i> F katman kalınlığı: 90 <i>mm</i> |
| 4 | 5 | EFEEF | E katman kalınlığı: 30 <i>mm</i> F katman kalınlığı: 45 <i>mm</i> |
| 5 | 8 | EFEEFEFE | E katman kalınlığı: 18 <i>mm</i> F katman kalınlığı: 30 <i>mm</i> |
| 6 | 13 | EFEEFEFEFEFEF | E katman kalınlığı: 11.25 <i>mm</i> F katman kalınlığı: 18 <i>mm</i> |
| 7 | 21 | EFEEFEFEFEFEFEFEFE | E katman kalınlığı: 6.92 <i>mm</i> F katman kalınlığı: 11.25 <i>mm</i> |

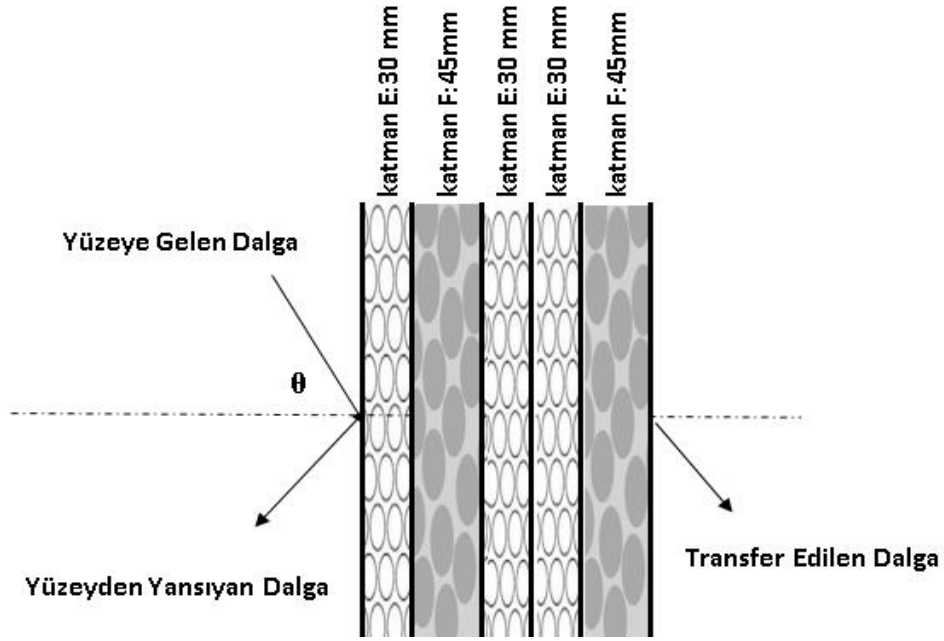
Şekil 6.7 “EF” iki katmanlı gözenekli yapının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini göstermektedir. Kalınlık ve malzeme özellikleri aynı kalmak şartı ile iki katmanlı yapıdan oluşturulan ve Çizelge 6.5’te ifade edilen, Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan yapıların her bir katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini ifade etmektedir.



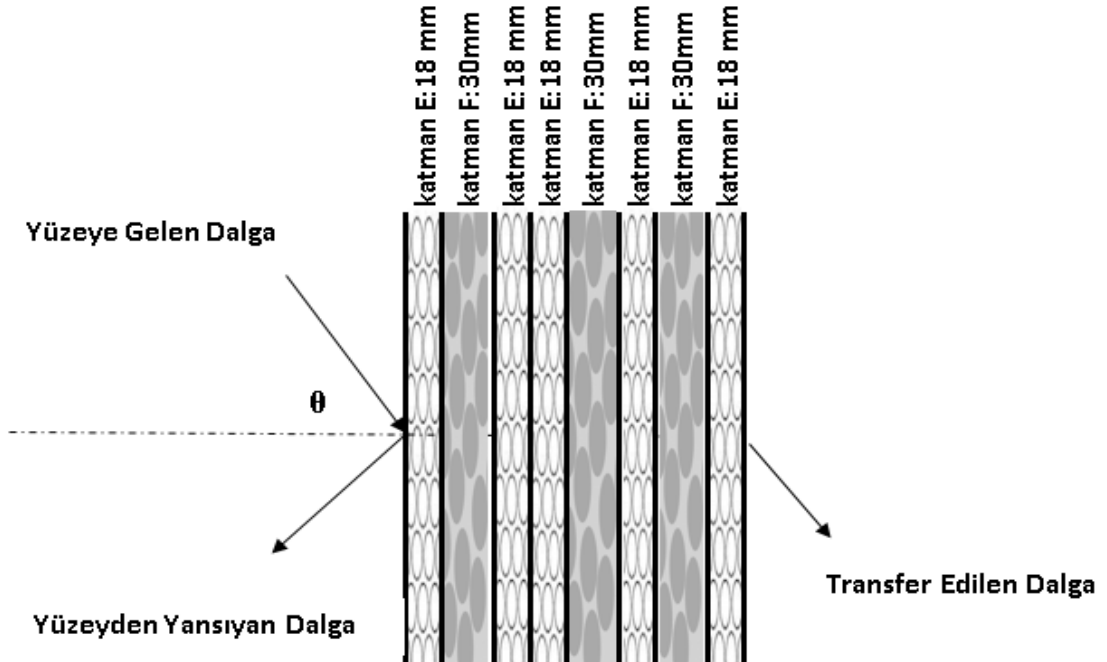
Şekil 6.7. İki katmanlı gözenekli “EF” yapısı. 90 mm E katman kalınlığı ve 90 mm F katman kalınlığı olmak üzere toplam kalınlığı 180 mm olan iki katmanlı yapı.



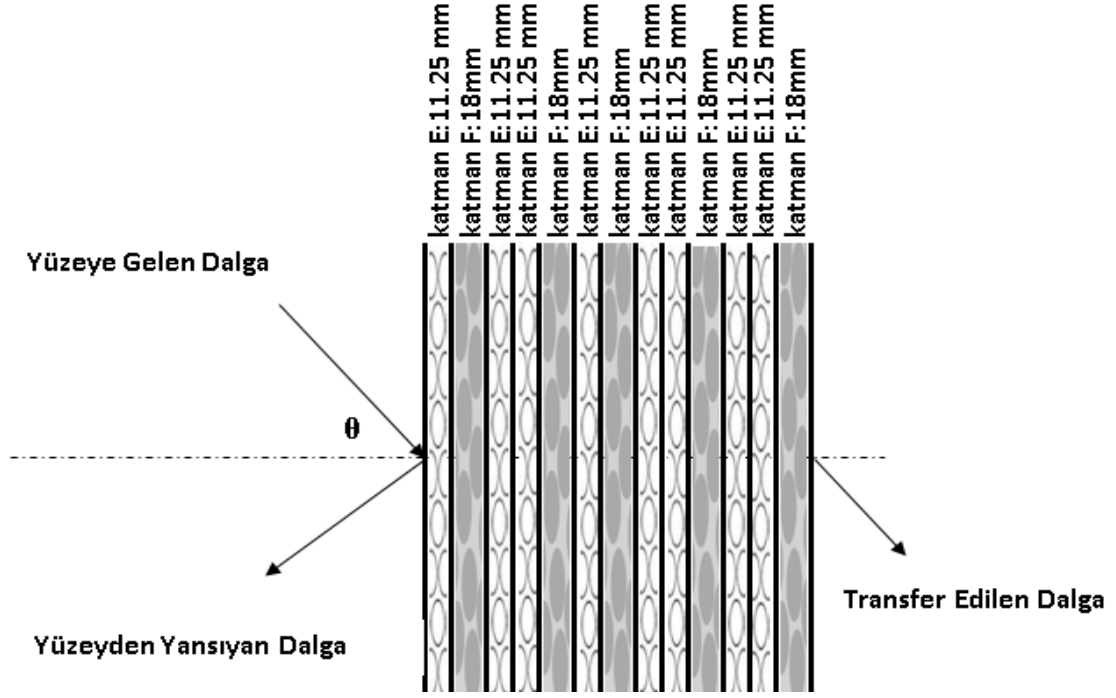
Şekil 6.8. Fibonacci Serisi diziliminin 3. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 45 mm ve F katman kalınlığı 90 mm olan üç katmanlı yapı



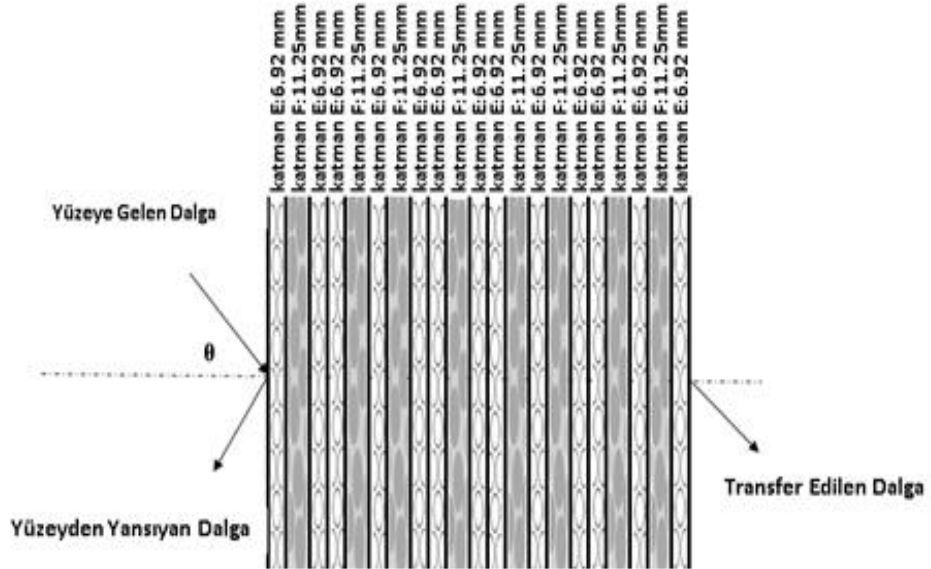
Şekil 6.9. Fibonacci Serisi diziliminin 4. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 30 mm ve her bir F katman kalınlığı 45 mm olan beş katmanlı yapı.



Şekil 6.10. Fibonacci Serisi diziliminin 5. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 18 mm ve her bir F katman kalınlığı 30 mm olan sekiz katmanlı yapı



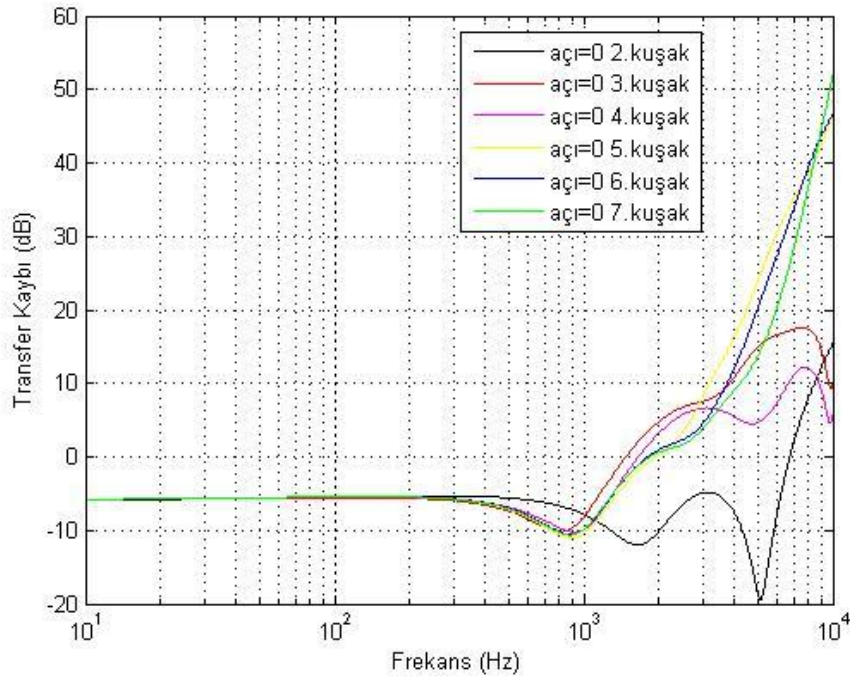
Şekil 6.11. Fibonacci Serisi diziliminin 6. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 11,25 mm ve her bir F katman kalınlığı 18 mm olan on üç katmanlı yapı



Şekil 6.12. Fibonacci Serisi diziliminin 7. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Her bir E katman kalınlığı 6,92 mm ve her bir F katman kalınlığı 11,25 mm olan yirmi bir katmanlı yapı

Şekil 6.7 ile gösterilen “EF” iki katmanlı gözenekli yapı ile Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 ile gösterilen Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan çok katmanlı yapıların akustik performans analizleri, transfer kayıpları (TL) göz önüne alınarak dB seviyesinde yapılmış ve Şekil 6.13’te karşılaştırılmıştır. Böylece malzeme özellikleri ve her bir katmanın toplam kalınlığı değişmezken, yapıların özel dizilim olan Fibonacci serisi diziliminin akustik performansa etkisi analiz edilmiştir.

Transfer kaybını fazla olması yapının daha iyi akustik yalıtım sağladığı anlamına gelmektedir. Şekil 6.13’te görülen karşılaştırma sonuçlarında, Fibonacci serisi diziliminin 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış yapıların 5000 Hz ve sonrasında iki katmanlı yapıya göre çok daha fazla emilim sağladığı ve ses yalıtımının daha iyi olduğu açık olarak görülmektedir. Fibonacci serisi 3 ve 4. kuşaklarına göre sıralanmış yapıların ise 1000 Hz ile 8000 Hz frekans bandında, iki katmanlı yapıya göre akustik performans üstünlüğü gözlemlenmektedir. Transfer kaybını negatif değerde olmasının nedeni yapı katmanlarının bir yönde sınırlı, diğer boyutta ise sonsuz kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda yayılan ses gücünün, katmana gelen ses gücüne oranı 1’den daha büyük olabilir ve transfer kaybı negatif değer gösterebilir [27].



Şekil 6.13. iki katmanlı gözenekli “EF” yapısı ile her bir katman kalınlığı ve malzeme özellikleri aynı olacak şekilde oluşturulan ve Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapıların ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması

6.2.3. Farklı Fibonacci Serisi Dizilimli Eş Katman Kalınlığı ve Katman Sayısına Sahip Gözenekli Yapıların Akustik Performans Analizleri

Bölüm 6.2.2’de yapılan çalışmada, iki katmanlı gözenekli yapı ile Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan çok katmanlı gözenekli yapıların akustik performansı karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada her model için, malzeme özellikleri ve toplam yapı kalınlığı aynı tutulmakta fakat katman sayıları serilerin kuşaklarına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada ise her model, malzeme özellikleri ve toplam yapı kalınlığı ile birlikte, katman sayısı da aynı kalacak şekilde Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre 42 katman olarak sıralanmıştır. Her bir Fibonacci Serisi diziliminin 42 katman sayısına ulaşması için dizilim tekrarlanmıştır. Örneğin 2. kuşak dizilim için G ve H katmanlarından oluşan bir yapı “GH” yapısı 21 kez tekrarlanmıştır. Yine aynı şekilde 3. kuşak dizilim için “GHG” yapısı 14 kez 42 katmana ulaşana dek tekrarlanmıştır. Böylece, Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşakları arasında akustik performans karşılaştırılmış ve hangi kuşak Fibonacci Serisi dizilimin en iyi akustik performans sağladığı incelenmiştir.

Transfer kayıpları, transfer matris metodu ile elde edilmiştir. Test edilen iki farklı gözenekli akustik halı malzemenin özellikleri Çizelge 6.6’da belirtilmiştir. İki farklı gözenekli akustik halı malzemesi Katman G ve Katman H olarak verilmektedir.

Çizelge 6.6. Akustik halı malzemesi Katman G ve Katman H malzeme özellikleri

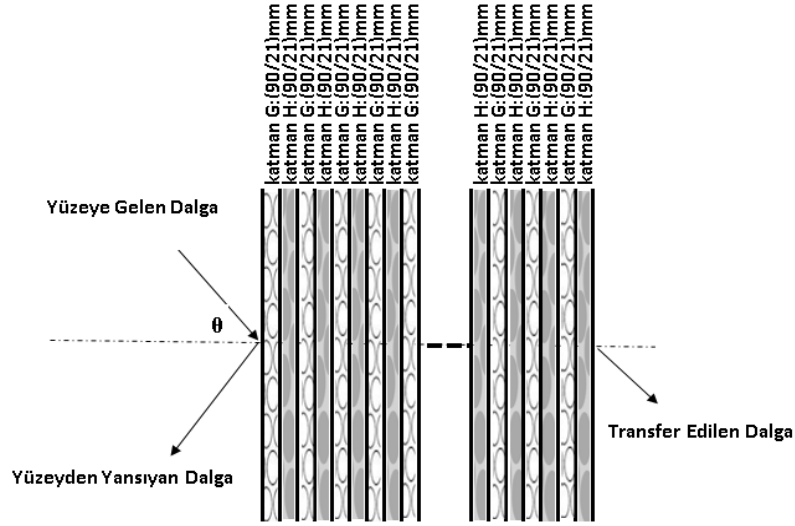
| Malzeme Parametreleri | Katman G:Gözenekli Halı Katman | Katman H:Gözenekli Halı Katman |
|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Katman Kalınlığı (<i>mm</i>) | 90 | 90 |
| Yoğunluk (<i>kg/m³</i>) | 59 | 130 |
| Shear modülü (<i>MPa</i>) | $(125+6,2i).10^{-3}$ | 220+22i |
| Poisson oranı | 0,3 | 0,3 |
| Hava Akış Direnci (<i>kg/m³.s</i>) | 130000 | 40000 |
| Bükümlülük (Porosity) | 0,98 | 0,94 |
| Gözeneklilik (Tortuosity) | 1,04 | 1,06 |
| Viskozite Boyutu (m) | 10^{-5} | $0,56.10^{-4}$ |
| Termal Boyutu (m) | 10^{-4} | $1,1.10^{-4}$ |

Analiz için G katman kalınlığı ve 90 *mm*, F Katman kalınlığı 90 *mm* olacak şekilde iki farklı gözenekli halı malzeme kullanılmıştır. Çizelge 6.5, Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre 42 katman olarak sıralanan G ve H katmanlarının katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini göstermektedir. Fibonacci Serisi diziliminin her kuşağı için toplam G katmanı 90 *mm* ve toplam H katmanı 90 *mm* olarak, katman kalınlıkları değişmeyecek şekilde ve 42 katman sayısı sabit olacak şekilde ayarlanmıştır.

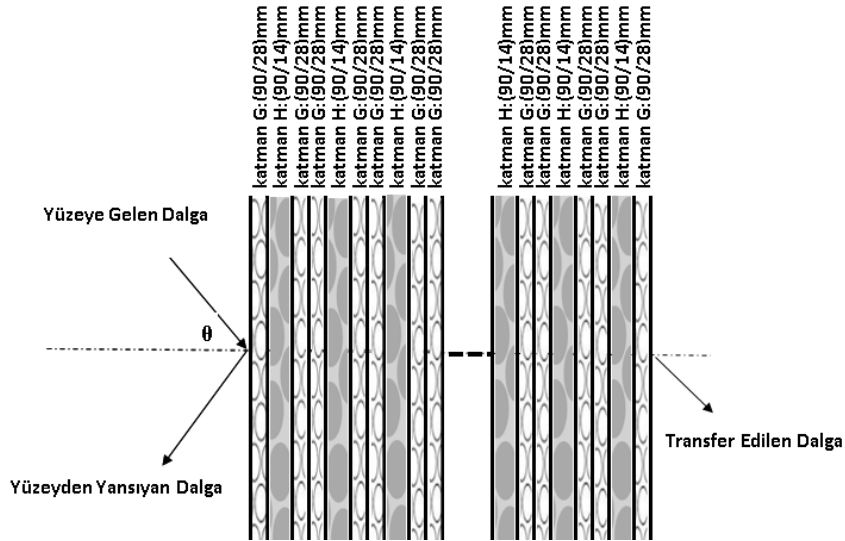
Çizelge 6.7. Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre 42 katman olarak sıralan G ve H katmanları toplam katman sıralaması ve katman kalınlıkları

| Fibonacci Serisi Kuşakları | Katman Sayısı | Katman Sıralaması | Katman Kalınlığı |
|-----------------------------------|----------------------|---|--|
| 2 | 42 | GHGHHGHGHHGH HGHGHHGHGHHGH GHGHHGHGHHGH HGHGHHGHGH | Her bir, G katman kalınlığı: (90/21) mm H katman kalınlığı: (90/21) mm |
| 3 | 42 | GHGGHGGHGGH GGHGGHGGHGG HGGHGGHGGHG GHGGHGGHG | Her bir, G katman kalınlığı: (90/28) mm H katman kalınlığı: (90/14) mm |
| 4 | 42 | GHGGHGHGGHG HGGHGHGGHGH GGHGHGGHGHG GHGHGGHGH | Her bir, G katman kalınlığı: (90/25) mm H katman kalınlığı: (90/17) mm |
| 5 | 42 | GHGGHGHGGHG GHGHGGHGGHG HGGHGGHGHGG HGGHGHGGH | Her bir, G katman kalınlığı: (90/26) mm H katman kalınlığı: (90/16) mm |
| 6 | 42 | GHGGHGHGGHG GHGHGGHGHGG HGGHGHGGHGH GGHGGHGGH | Her bir, G katman kalınlığı: (90/26) mm H katman kalınlığı: (90/16) mm |
| 7 | 42 | GHGGHGHGGHG GHGHGGHGHGG HGGHGHGGHGG HGHGGHGHG | Her bir, G katman kalınlığı: (90/26) mm H katman kalınlığı: (90/16) mm |

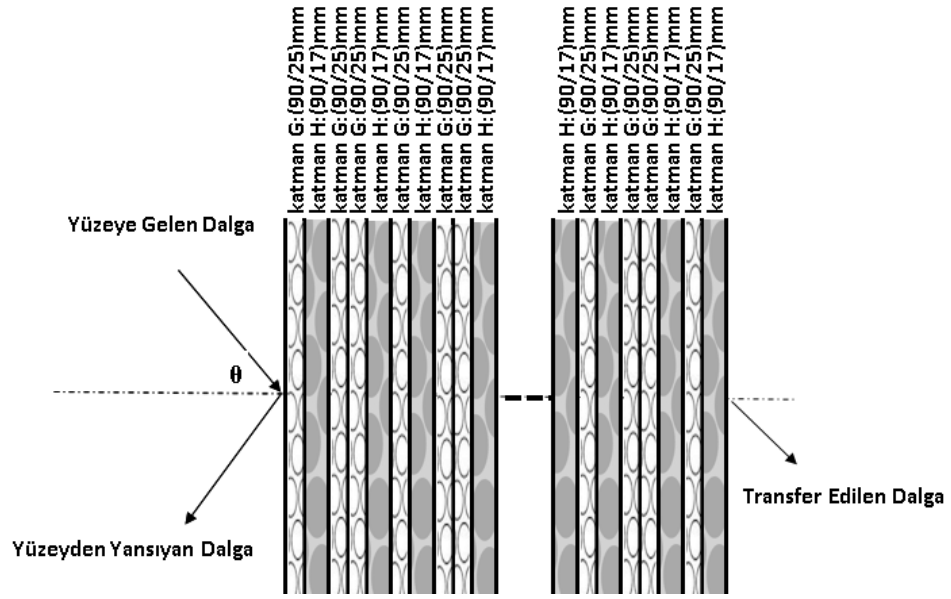
Kalınlık, malzeme özellikleri ve 42 katman sayısı sabit kalmak şartı ile oluşturulan ve Çizelge 6.7' de ifade edilen, Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan yapıların her bir katman kalınlıklarını ve sıralanma şeklini ifade etmektedir



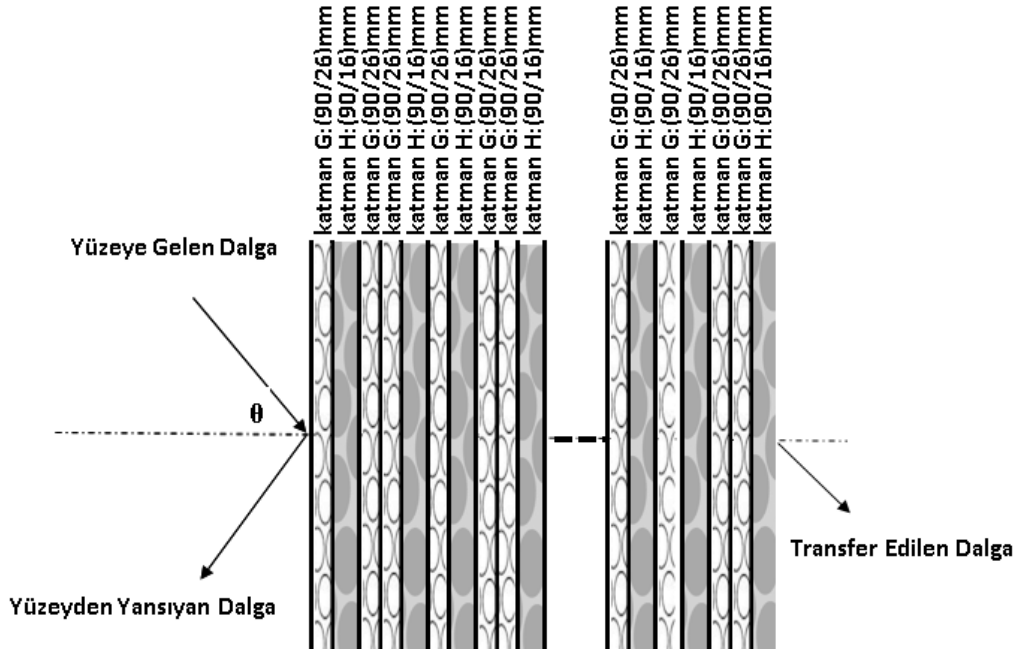
Şekil 6.14. Fibonacci Serisi diziliminin 2. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı



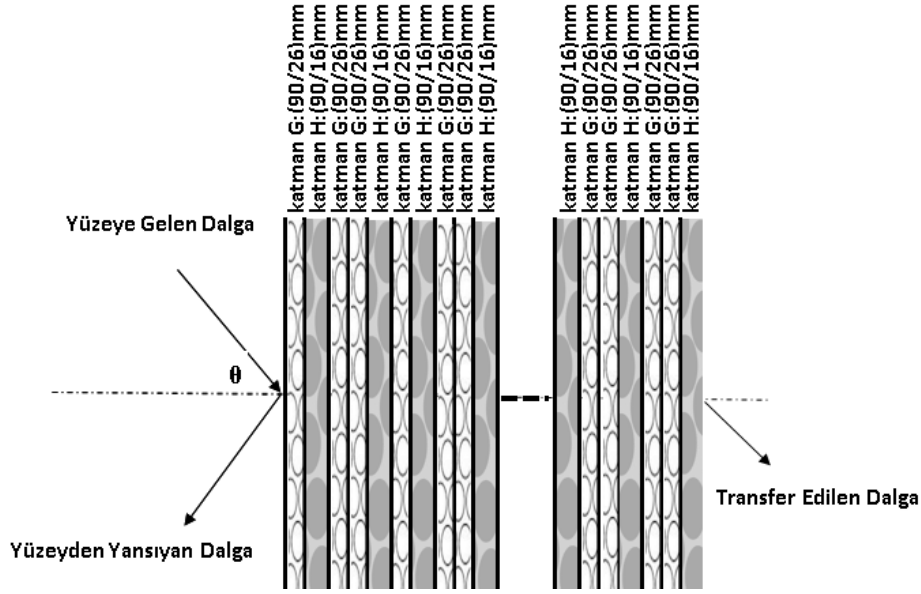
Şekil 6.15. Fibonacci Serisi diziliminin 3. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı



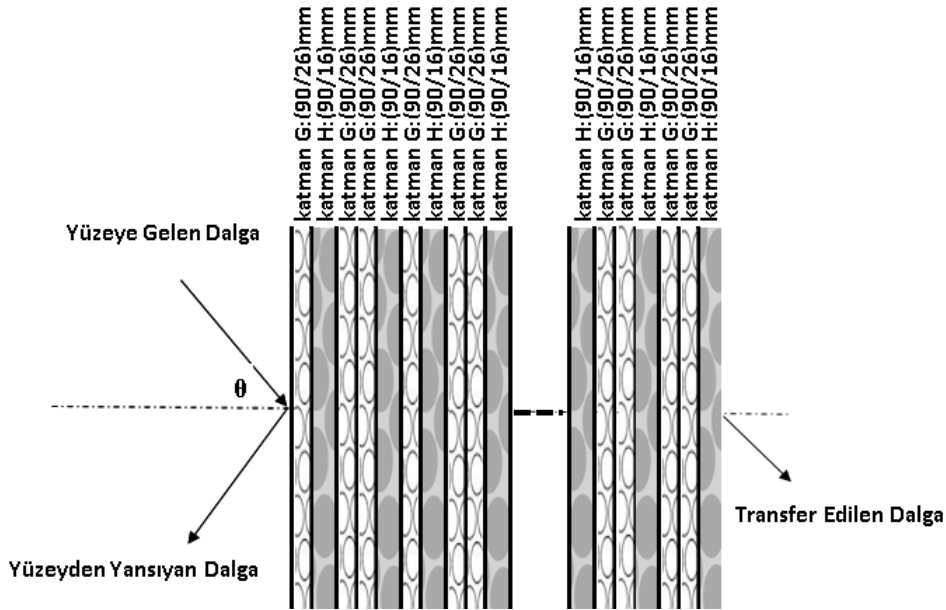
Şekil 6.16. Fibonacci Serisi diziliminin 4. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı



Şekil 6.17. Fibonacci Serisi diziliminin 5. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı



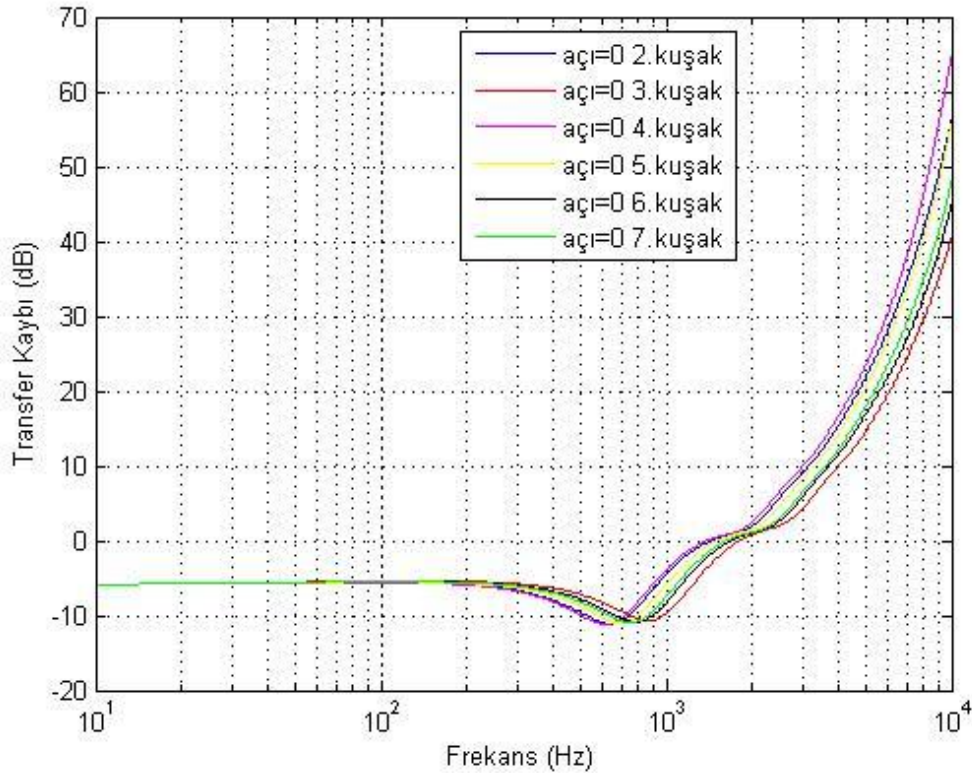
Şekil 6.18. Fibonacci Serisi diziliminin 6. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı



Şekil 6.19. Fibonacci Serisi diziliminin 7. kuşağına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapı. Toplam G katman kalınlığı 90 mm ve toplam H katman kalınlığı 90 mm olan 42 katmanlı yapı

Şekil 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 ve 6.19 ile gösterilen Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre 42 katman olarak sıralanan yapıların akustik performans analizleri, transfer kayıpları (TL) göz önüne alınarak dB seviyesinde yapılmış ve Şekil 6.20'de karşılaştırılmıştır. Böylece malzeme özellikleri, her bir katmanın kalınlığı ve katman sayıları değişmezken, Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşakları arasında akustik

performansları karşılaştırılmıştır. Frekans arttıkça 4. kuşak Fibonacci Serisi diziliminin akustik performans ve ses yalıtımı olarak en iyi sonuç gösterdiği gözlemlenmiştir. 3. kuşak Fibonacci Serisi diziliminin, akustik performansının diğer kuşaklara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Transfer kaybını negatif değerde olmasının nedeni yapı katmanlarının bir yönde sınırlı, diğer boyutta ise sonsuz kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda yayılan ses gücünün, katmana gelen ses gücüne oranı 1'den daha büyük olabilir ve transfer kaybı negatif değer gösterebilir [27].



Şekil 6.20. Toplam katman kalınlığı, malzeme özellikleri ve katman sayısı aynı olacak şekilde oluşturulan, Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapıların ses transfer kayıplarının (TL) dB seviyesinde karşılaştırılması.

Çizelge 6.8. Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanmış çok katmanlı gözenekli yapıların ses yalıtım performansı sıralaması

| Ses Yalıtım Performans Sıralaması | Fibonacci Serisi Jenerasyonları |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1. | 4. Kuşak Fibonacci Serisi |
| 2. | 2. Kuşak Fibonacci Serisi |
| 3. | 5. Kuşak Fibonacci Serisi |
| 4. | 7. Kuşak Fibonacci Serisi |
| 5. | 6. Kuşak Fibonacci Serisi |
| 6. | 3. Kuşak Fibonacci Serisi |

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışması kapsamında, katı sıvı ve gözenekli maddelerden oluşan yapı katmanları, birbiri ardına ve Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşaklarına göre özel seriler olarak sıralanmış ve çok katmanlı yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan yapı modellerinin yüzeylerine gönderilen ses dalgalarına gösterdikleri akustik performansları, transfer kayıpları değerlendirilerek hesaplanmıştır.

Farklı dizilimlere sahip tasarlanmış olan çok katmanlı yapıların akustik performans hesaplamaları, çalışma için yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB programı ile transfer kayıpları (TL) analiz edilerek dB seviyesinde 100-10000 Hz frekans bandında yapılmıştır.

Modellemeler öncesinde, yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB programının doğruluğu çeşitli makalelerde özellikleri bilinen malzemeler ile oluşturulan modellere ait sonuçların sağlanmasıyla gösterilmiştir.

Tüm ses iletim kaybı karşılaştırmalarında yapının kalınlığı sonlu, diğer boyutları ise sonsuz kabul edilmiştir. Bu karşılaştırma ilk olarak, iki katmanlı gözenekli yapıyla, aynı malzemelerle ve her bir katman kalınlığı aynı kalacak şekilde oluşturulan çok katmanlı yapı arasında yapılmıştır. Yapının toplam katman kalınlıkları değişmezken, katman sayısının arttırılmasının akustik yalıtım performansına etkisi incelenmiştir. Transfer Matris Metodu MATLAB programı ile transfer kayıpları (TL) analiz edilerek dB seviyesinde karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, çok katmanlı yapının her frekansta daha iyi sonuç verdiği ve akustik yalıtım performansının daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Çok katmanlı yapının akustik yalıtıma etkisini incelemek üzere yapılan ikinci çalışmada, iki alçıpan katı katman arasına hava boşluğu bırakılarak modellenen yapıyla aynı malzemeler ile toplam yapı kalınlığı korunacak şekilde elde edilen çok katmanlı yapının akustik yalıtım performansları karşılaştırılmıştır. Yapının toplam katman kalınlıkları değişmezken, katman sayısının arttırılmasının ve hava boşluğunun akustik performansa etkisi incelenmiştir. Transfer Matris Metodu MATLAB programı ile transfer kayıpları (TL) analiz edilerek dB seviyesinde karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına değerlendirildiğinde, çok katmanlı ve aralarında hava boşluğunun daha fazla bırakıldığı yapının yüksek frekanslarda daha iyi sonuç verdiği ve akustik yalıtım performansının daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Özel dizilimlere sahip çok katmanlı yapıların akustik analizi için Fibonacci Serisi diziliminin farklı kuşaklarına göre sıralanmış yapılar kullanılmıştır. İki farklı gözenekli malzeme kullanılarak oluşturulan iki katmanlı yapıyla, aynı malzemeler kullanılarak, toplam yapı kalınlığı korunacak şekilde oluşturulan ve katmanları Fibonacci Serisi diziliminin 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre sıralanan çok katmanlı yapıların transfer kayıpları araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, genel olarak Fibonacci Serisi diziliminde kuşak arttıkça ses yalıtımının daha iyi olduğu ve daha fazla yutum sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu tez çalışmasının son aşamasında ise her model, bu defa gözenekli malzeme özellikleri ve toplam yapı kalınlığı ile birlikte, katman sayısı da aynı kalacak şekilde Fibonacci Serisi diziliminin 2, 3, 4, 5, 6 ve 7. kuşaklarına göre yeniden 42 katman olarak sıralanmıştır. Her bir Fibonacci Serisi diziliminin 42 katman sayısına ulaşması için dizilim tekrarlanmıştır. Böylece hangi kuşak Fibonacci Serisi diziliminin diğerlerine göre daha iyi akustik yalıtım performansı sağladığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, frekans arttıkça 4. kuşak Fibonacci Serisi diziliminin akustik performans ve ses yalıtımı olarak en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir.

Çalışmalar sırasında elde edilen sonuçların literatürle karşılaştırmaları incelendiğinde yazılan Transfer Matris Metodu MATLAB programının doğru bir biçimde çalıştığı ve tatmin edici sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Yapılan transfer kaybı hesaplamalarının diğer bir önemli avantajı da hızlı bir şekilde hesaplama sonuçları vermesidir. Böylece, günümüzde mühendislik problemlerinin çözümü, uzun zaman süren test süreçleri yerine kolayca, pratik ve teorik olarak sağlanacaktır. Çalışmalarda elde edilen sonuçlar akustik performansın önemli olduğu konut, otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayi sektöründe akustik malzeme performansının belirlenmesi ve geliştirilmesinde, zaman kaybının önüne geçilmesi ve iş gücünün artırılması açısından oldukça önemli role sahiptir.

Bu tez çalışmasının devamında özel dizilime sahip yapılar için ses iletim kaybı incelenebilir. Böylelikle ileri akustik yalıtım performans ihtiyacını karşılayacak yeni ve özel malzemeler üzerine çalışılması ve başka özel dizilime sahip yapılarla ses yalıtım performansının artırılması için ileri bir çalışmanın yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Skinner, C., Peters, J., Vandenbroeck, J., Acoustic Absorbers A Third Way For the Management of Sound in Automobiles, *International Urethanes Technology Conference*, **2006**.
- [2] Wareing, A., *Acoustic Modeling of Rooms with Extended-Reaction Surfaces*, PhD. Thesis, University of British Columbia, Columbia, **2000**.
- [3] Abid, M., Abbes, M. S., Chazot, J. D., Hammemi, L., Hamdi, M. A., Haddar, M., Acoustic Response of a Multilayer Panel with Viscoelastic Material, *International Journal of Acoustics and Vibration*, cilt. 17, no. 2, sf. 82-89, **2012**.
- [4] Biot, M. A., Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Filled Saturated Porous Solid, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 28, no. 2, sf. 168-191, **1956**.
- [5] Thomson, W. T., Transmission of Elastic Waves Through a Stratified Solid Medium, *Journal of Applied Physics*, cilt. 21, no. 2, sf. 89-93, **1950**.
- [6] Tadeu, A., António, J., Mateus, D., Sound Insulation Provided by Single and Double Panel Walls, *Applied Acoustics*, cilt. 65, no. 1, sf. 15-29, **2004**.
- [7] Panneton, R., Atalla, N., Numerical Prediction of Sound Transmission Through Finite Multilayer Systems with Poroelastic Materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 100, no. 2, sf. 346-354, **1996**.
- [8] Sgard, F. C., Atalla, N., Nicolas, J., A Numerical Model for the Low Frequency Diffuse Field Sound Transmission Loss of Double-Wall Sound Barriers with Elastic Porous Linings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 108, no. 6, sf. 2865-2872, **2000**.
- [9] Beranek, L. L., Acoustical Properties of Homogeneous, Isotropic Rigid Tiles and Flexible Blankets, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 108, no. 6, sf. 556-568, **1947**.
- [10] Zwikker, C., Kosten, C. W., *Sound Absorbing Materials*, Elsevier, **1949**.
- [11] Biot, M. A., Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid Low-Frequency Range, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 28, no. 2, sf. 168-178, **1956**.
- [12] Delany, M. E., Bazley, E. N., Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials, *Applied Acoustics*, cilt. 3, no. 2, sf. 105-116, **1970**.
- [13] Folds, D. L., Loggins, C. D., Transmission and Reflection of Ultrasonic Waves in Layered Media, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 62, no. 5, sf. 1102-1109, **1977**.
- [14] Attenborough, K., Acoustical Characteristics of Rigid Fibrous Absorbents and Granular Materials. *The Journal of The Acoustical Society of America*, cilt. 73, no. 3, sf. 785-799, **1983**.
- [15] Johnson, D. L., Koplik, J., Dashen, R., Theory of Dynamic Permeability and Tortuosity in Fluid-Saturated Porous Media. *Journal of Fluid Mechanics*, cilt. 176, sf. 379-402, **1987**.

- [16] Mueller, P. P., Tschudi, H. R., *Modelling of Flat Multi-Layer Acoustic Structures with Transfer Matrices*, SAE Technical Paper, **1989**.
- [17] Allard, J. F., Champoux, Y., Depollier, C., Modelization of Layered Sound Absorbing Materials with Transfer Matrices, *Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 82, no. 5, sf. 1792-1796, **1987**.
- [18] Allard, J. F., Bourdier, R., Depollier, C, Inhomogeneous Biot Waves in Layered Media, *Journal of Applied Physics*, cilt. 66, no. 6, sf. 2278-2284, **1989**.
- [19] Allard, J. F., *Propagation of Sound in Porous Media*, Elsevier, **1993**.
- [20] Song, B H., Bolton, J. S., *Transfer Matrix Approach to the Estimation of the Fundamental Acoustical Properties of Noise Control Materials*, SAE Technical Paper, **1999**.
- [21] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, Wiley, **1999**.
- [22] Hodgson, M., Wareing, A., Prediction of Sound Levels in Rooms with Local and Extended Reaction Surfaces, *Canadian Acoustics*, cilt. 29, no. 4, sf. 30-31. **2001**.
- [23] Khurana, P., Boeckx, L., Lauriks, W., Leclaire, P., Dazel, O, Allard, J. F., A Description of Transversely Isotropic Sound Absorbing Porous Materials by Transfer Matrices, *The Journal of the Acoustical Society of America*, cilt. 125, no. 2, sf. 915-921, **2009**.
- [24] Liu, Y., Sound Transmission Through Triple-Panel Structures Lined with Poroelastic Materials, *Journal of Sound and Vibration*, cilt. 339, no. 1, sf. 376-395, **2015**
- [25] Zent, A., Long, J. T., *Automotive Sound Absorbing Material Survey Results*, SAE Technical Paper, **2007**.
- [26] Brouard, B., Lafarge, D., Allard, J. F., A General Method of Modelling Sound Propagation in Layered Media, *Journal of Sound and Vibration*, cilt. 183, no. 1, sf 129-142, **1995**.
- [27] Thompson, D. J., Gardonio, P., Rohlifing, J., Can a transmission coefficient be greater than unity, *Applied Acoustics*, cilt. 70, no. 5, sf 681-688, **2009**.

EK

SÖZLÜK

Türkçe

Boylamsal dalga

Bükümlülük

Emilim katsayısı

Enlemsel dalga

Gözeneklilik

Hava akış direnci

Kayma modülü

Termal boyutu

Transfer katsayısı

Transfer kaybı

Viskozite boyutu

Yansıma katsayısı

İngilizce

Compressional wave

Porosity

Absorbtion coefficient

Shear wave

Tortuosity

Flow resistivity

Shear module

Thermal dimension

Transmission coefficient

Transmission loss

Viscous dimension

Reflection coefficient

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Gamze DAĞ

Doğum Yeri : Altındağ/ANKARA

Medeni Hali : Bekar

E-posta : gamze.dag@hotmail.com

Adresi : Kentkoop Mahallesi 4.Cadde 148. Sokak Haskenet Sitesi Batıkent/ANKARA

Eğitim

Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İleri seviye

Almanca : Orta seviye

İş Deneyimi

02.07.2011-02.07.2012 : Başkent Üniversitesi - Araştırma Görevlisi

02.07.2012- 27.06.2017 : ARÇELİK A.Ş. - ARGE Mühendisi

10.07.2017- : Artron Tasarım - Sistem Mühendisi

Deneyim Alanları

Sistem mühendisliği, yazılım geliştirme ve yazılım test süreçleri.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 28/09/2017

Tez Başlığı / Konusu: Çok Katmanlı Yapılarda Ses Dalgası Yayılımının İncelenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 71 sayfalık kısmına ilişkin, 28/09/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6 'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça dâhil
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: GAMZE DAĞ
Öğrenci No: N10320460
Anabilim Dalı: ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Programı: ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ- YÜKSEK LİSANS
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

02.10.2017

Gamze DAĞ

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

PROF. DR. ÇİĞDEM SEÇKİN GÜREL

(Unvan, Ad Soyad, İmza)