

**SUALTI UYGULAMALARI İÇİN ÇOK KATMANLI
AKUSTİK YÜZEY TASARIMI**

**MULTILAYERED ACOUSTIC SURFACE DESIGN FOR
UNDERWATER APPLICATIONS**

İREM KAYA

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.

2022

ÖZET

SUALTI UYGULAMALARI İÇİN ÇOK KATMANLI AKUSTİK YÜZEY TASARIMI

İrem KAYA

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Ocak 2022, 84 sayfa

Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte akustik konusu önem kazanmaya başlamıştır. Literatürde farklı türde malzemeler kullanılarak ses yutucu ve yansıtıcı özelliği olan çok katmanlı akustik panel tasarımları yer almakta ve ses yalıtımı amacıyla kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, literatürde henüz yer almayan, katman dizilimi Cantor serilerine göre yapılmış, yeni çok katmanlı akustik paneller tasarlanmıştır. Bu tasarımlarda Cantor serisinin ilk üç kademesine göre yapılar oluşturulmuş ve güncel elastik ve gözenekli malzemeler kullanılmıştır. İncelemelerde analitik bir yöntem olan Transfer Matris Metodundan (TMM) yararlanılmış, oluşturulan panellerin ses yutma davranışları farklı yapısal parametreler için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Cantor serileriyle yapılan akustik panel tasarımlarının oldukça iyi yalıtım özellikleri gösterdiğini ve literatürde mevcut olanlara alternatif olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Cantor serilerine ek olarak aynı malzemelerle Fibonacci serilerinin dört, beş ve altıncı kademelerine göre yeni ve farklı akustik paneller tasarlanmış ve ses yutma davranışları incelenmiştir. Daha sonra Cantor ve Fibonacci dizilimli panellerin performansları kıyaslanmıştır.

Tasarlanan paneller, denizaltı kaplama uygulamalarını modellemek üzere elik malzeme üzerine uygulanarak, oluşan yüzeyin sesle etkileşimi incelenmiştir. Sonuç olarak, Cantor ve Fibonacci serileri ile hava ve su ortamında çalışmak üzere tasarlanan panellerin birçok farklı ses yalıtım uygulamalarında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akustik Panel, Sesin Yayılımı, Transfer Matris Metodu (TMM), ok Katmanlı Yapı, Transfer Kaybı, Cantor Serisi, Fibonacci Serisi.

ABSTRACT

MULTILAYERED ACOUSTIC SURFACE DESIGN FOR UNDERWATER APPLICATIONS

İrem KAYA

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

January 2022, 84 pages

In recent years, with the development of technology, acoustics has started to gain importance. In the literature, there are various multilayer acoustic panel designs with sound absorbing and reflective properties using different types of materials for sound insulation purposes.

In this study, multilayered acoustic panels with layers arranged according to Cantor series are designed which are new for literature. First three stages of Cantor series are used with elastic and porous materials. Transfer Matrix Method (TMM), which is an analytical method, is used in the analyses and the sound absorption behavior of the panels is examined for different structural parameters. The results obtained show that acoustic panel designs depending on Cantor series exhibit very good insulation properties and can be used as an alternative to similar designs available in the literature.

In addition to the Cantor series, by using same materials, new and different acoustic panels for the operation in air and water mediums are designed according to the fourth, fifth and sixth stages of the Fibonacci series, and their sound absorption behaviors are examined. The performances of the panels with Cantor and Fibonacci series are compared.

The designed panels are applied on steel material to model submarine coating applications and the response of the surface to acoustic wave is analyzed. As a result, it is shown that designed panels according to Cantor and Fibonacci Series operating in air and water mediums can be used in practical sound isolation applications.

Keywords: Acoustic Panel, Sound Propagation, Transfer Matrix Method (TMM), Multilayer Structure, Transmission Loss, Cantor Series, Fibonacci Series.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez döneminde tanıştığım, her zaman ve en önemlisi en çok ihtiyacım olan dönemde desteğiyle yanımda olan, yol gösteren ve tezimi bitirmemde en çok emeği geçen çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL'e içtenlikle teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan annem Şerife KAYA, babam Halis KAYA, kardeşim Emirhan KAYA'ya ve bu süreçte beni yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Tezin Kapsamı.....	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. SES VE AKUSTİK	7
3.1 Akustik Yalıtım Malzemeleri	10
3.2 Ses Yayılımının İncelenmesi	11
3.3 Ses Dalgasının Farklı Ortamlarda Yayılımı	13
3.3.1 Sıvı Ortamda Ses Dalgası Yayılımı	13
3.3.2 Katı Ortamda Ses Dalgası Yayılımı.....	15
3.3.3 Gözenekli Ortamda Ses Dalgası Yayılımı	18
3.4 Ses Dalgasının Çok Katmanlı Ortamlarda Yayılımı	22
4. ÇOK KATMANLI PANELLER İÇİN BAZI LİTERATÜR SONUÇLARI VE DOĞRULANMASI	33
5. ÇOK KATMANLI PANELLERİN TASARIM VE ANALİZİ	39
5.1 Hava Ortamında Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımları	39
5.1.1 Cantor Seri Dizilimli Çok Katmanlı Panel Tasarımları.....	39
5.1.1.1 Elastik (A) - Gözenekli Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel.....	42

5.1.1.2	Gözenekli (A) - Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel.....	44
5.1.1.3	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 81 mm Olan Panel	45
5.1.2	Fibonacci Seri Dizilimli Çok Katmanlı Panel Tasarımları.....	47
5.1.2.1	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel	49
5.1.2.2	Gözenekli (A) – Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel	51
5.1.2.3	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 81 mm Olan Panel	52
5.2	Su Ortamında Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımları.....	55
5.2.1	Cantor Seri Dizilimli Su Ortamında Çok Katmanlı Panel Tasarımları.....	56
5.2.1.1	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel	57
5.2.1.2	Gözenekli (A) – Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel	59
5.2.1.3	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 81 mm Olan Panel	60
5.2.1	Fibonacci Serisi Dizilimli Su Ortamında Çok Katmanlı Panel Tasarımları	63
5.2.1.1	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel	64
5.2.1.2	Gözenekli (A) – Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel	66
5.2.1.3	Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 81 mm Olan Panel	67
5.3	Sualtı Uygulamalarında Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımları.....	70
6.	GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR	75
7.	KAYNAKLAR	77
	EKLER	82
	EK 4 - Tezden Türetilmiş Yayınlar.....	82
	EK 5 - Tezden Türetilmiş Bildiriler	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Ses dalgası.....	7
Şekil 3.2. Ses dalgasının frekanslara göre sınıflandırılması.....	8
Şekil 3.3. Lifli levha [25].	10
Şekil 3.4. Kauçuk tabanlı akustik halı [26].	11
Şekil 3.5. Sunta panel [27].	11
Şekil 3.6. Çok katmanlı ortamda gelen, yansıyan ve iletilen ses dalgası.	12
Şekil 3.7. (a) Enlemsel dalga ve (b) boylamsal dalga [30].	15
Şekil 4.1. Literatürden sağlanan gözenekli-hava-elastik-hava-gözenekli-hava-elastik katman dizilimine sahip çok katmanlı panel.....	34
Şekil 4.2. (a) Literatürden sağlanan gözenekli-hava-elastik-hava-gözenekli-hava-elastik katman dizilimine sahip çok katmanlı panel için emilim katsayısı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.	35
Şekil 4.3. (a) Literatürden sağlanan gözenekli-hava-elastik-hava-gözenekli-hava-elastik katman dizilimine sahip çok katmanlı panel için transfer kaybı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.....	36
Şekil 4.4. Literatürden sağlanan çok katmanlı gözenekli-hava-elastik dizilimine sahip çok katmanlı panel [37].....	37
Şekil 4.5. (a) Literatürden sağlanan çok katmanlı gözenekli-hava-elastik dizilimine sahip çok katmanlı panel için emilim katsayısı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.	37
Şekil 4.6. (a) Literatürden sağlanan çok katmanlı gözenekli-hava-elastik dizilimine sahip çok katmanlı panel için transfer kaybı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.	38
Şekil 5.1. Cantor serisinde farklı kademelerin üretilmesi.	40
Şekil 5.2. Cantor serisi kademe 1 dizilim yapısı.	41
Şekil 5.3. Cantor serisi kademe 2 dizilim yapısı.	41

Şekil 5.4. Cantor serisi kademe 3 dizilim yapısı.	41
Şekil 5.5. Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı.	42
Şekil 5.6. Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı.	43
Şekil 5.7. Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı.	43
Şekil 5.8. Cantor serisi farklı kademelere göre transfer kaybı.	44
Şekil 5.9. Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı farkı.....	45
Şekil 5.10. Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı farkı.....	46
Şekil 5.11. Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı farkı.....	47
Şekil 5.12. Fibonacci serisi 4. kuşak dizilim yapısı.....	48
Şekil 5.13. Fibonacci serisi 5. kuşak dizilim yapısı.....	49
Şekil 5.14. Fibonacci serisi 6. kuşak dizilim yapısı.....	49
Şekil 5.15. Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı.	49
Şekil 5.16. Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı.	50
Şekil 5.17. Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı.	51
Şekil 5.18. Fibonacci serisi farklı kuşaklara göre transfer kaybı.....	52
Şekil 5.19. Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı farkı.....	53
Şekil 5.20. Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı farkı.....	54
Şekil 5.21. Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı farkı.....	55
Şekil 5.22. Su ortamında Cantor serisi kademe 1 dizilim yapısı.....	56
Şekil 5.23. Su ortamında Cantor serisi kademe 2 dizilim yapısı.....	56
Şekil 5.24. Su ortamında Cantor serisi kademe 3 dizilim yapısı.....	57
Şekil 5.25. Su ortamında Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı.....	57
Şekil 5.26. Su ortamında Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı.....	58
Şekil 5.27. Su ortamında Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı.....	59
Şekil 5.28. Su ortamında Cantor serisi farklı kademelere göre transfer kaybı.....	60
Şekil 5.29. Su ortamında Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı farkı.....	61

Şekil 5.30. Su ortamında Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı farkı.....	62
Şekil 5.31. Su ortamında Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı farkı.....	63
Şekil 5.32. Su ortamında Fibonacci serisi 4. kuşak dizilim yapısı.....	63
Şekil 5.33. Su ortamında Fibonacci serisi 5. kuşak dizilim yapısı.....	64
Şekil 5.34. Su ortamında Fibonacci serisi 6. kuşak dizilim yapısı.....	64
Şekil 5.35. Su ortamında Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı.....	64
Şekil 5.36. Su ortamında Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı.....	65
Şekil 5.37. Su ortamında Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı.....	66
Şekil 5.38. Su ortamında Fibonacci serisi farklı kuşaklara göre transfer kaybı.....	67
Şekil 5.39. Su ortamında Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı farkı.....	68
Şekil 5.40. Su ortamında Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı farkı.....	69
Şekil 5.41. Su ortamında Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı farkı.....	69
Şekil 5.42. Cantor serisi kademe 1 ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.....	71
Şekil 5.43. Cantor serisi kademe 2 ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.....	71
Şekil 5.44. Cantor serisi kademe 3 ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.....	72
Şekil 5.45. Cantor serisi ile yapılan kaplamaya ait transfer kaybı.....	72
Şekil 5.46. Fibonacci serisi 4. kuşak ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.....	73
Şekil 5.47. Fibonacci serisi 5. kuşak ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.....	73
Şekil 5.48. Fibonacci serisi 6. kuşak ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.....	73
Şekil 5.49. Fibonacci serisi ile yapılan kaplamaya ait transfer kaybı.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 4.1. Test edilen üç farklı malzemenin akustik temel özellikleri [37].....	33
Tablo 5.1. Akustik panel tasarımında kullanılan elastik ve gözenekli malzemelerin temel özellikleri.....	40
Tablo 5.2. Fibonacci Serisinin Kuşaklara Göre Katman Sayısı ve Dizilimi.....	48
Tablo 5.3. Sualtı uygulamaları akustik panel tasarımında kullanılan malzemelerin temel özellikleri.....	70

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte akustik konusu önem kazanmaya başlamıştır. Akustik, rahatsız edici gürültüden arınmış yaşam alanları oluşturulmasında önemli rol oynamaktadır. Bir başka deyişle sürdürülebilir bir hayat için önemi büyük olan bir disiplindir.

Gürültü, gelişen teknolojiyle birlikte giderilmesi gereken problem haline gelmeye başlamıştır. Endüstriyel makinalar, motorlu taşıtlar, havalandırma sistemleri gibi birçok etmen gürültüye sebep olmaktadır. Akustik, gürültüyü kontrol etmede kullanılan önemli bir disiplin olduğundan özellikle otomotiv sektörü için giderek önem kazanmaya başlamıştır. Sadece insanlar için değil hayvanlar için de gürültü kirliliğinin zararlı hale gelmeye başladığı, özellikle sualtında yaşayan canlılardan balina ve yunusları olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Bu kapsamda istenmeyen ses olarak adlandırılan gürültü kirliliğini önlemek için ses yalıtımı sağlayan yapılar kullanılması gerekmektedir.

Ses, çarptığı yüzeyin yapısına ve özelliklerine göre hareket etmektedir. Ses dalga olarak yayıldığından ortamda tek veya çok katmanlı bir engel olması durumunda bu engele çarparak yansiyabilir ve bir kısmı iletilebilir. Ses dalgasının geldiği yüzeyin tek veya çok katmanlı olması durumuna ve katmanların malzeme özelliklerine göre yüzeyden yansıyan ve iletilen güç miktarları değişecektir.

Sualtı uygulamalarında ise sesin yayılmasının birçok alanda önemi mevcuttur. Özellikle sonar sistemlerinde sesin yayılması esnasında bir cisme çarpması ve yansıyan dalga ile hedef tespitinde kullanılmaktadır. Fakat gizliliğin önemli olduğu durumlarda gelen ses dalgasının yalıtımı oldukça önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında çok katmanlı bazı akustik yüzeyler tasarlanarak bu yüzeylere gelen ses dalgalarının davranışı incelenmiştir. Oluşturulan çok katmanlı yüzey tasarımlarında Cantor ve Fibonacci serilerinden faydalanılmış, MATLAB ortamında benzetim ile Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılarak hava ve sualtı ortamında belirli bir frekans aralığında ses emilimini sağlayan yapılar tasarlanarak akustik performansları incelenmiştir. Tasarlanan bu yapılar ses dalgasının karşılaştığı engel yüzeyleri olarak da düşünülebilir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, literatür için yeni çok katmanlı akustik panellerin Cantor ve Fibonacci serilerine göre tasarlanması, bunların hava ve su ortamlarında ayrı ayrı davranışlarının MATLAB ortamında incelenmesi ile güncel ses yalıtım uygulamaları için akustik kaplama malzemeleri olarak önerilmesidir.

1.2 Tezin Kapsamı

Bu tez çalışmasına çok katmanlı akustik panellerin tasarımı ile ilgili daha önce yapılan literatür çalışmaları incelenerek başlanmıştır. Daha sonra ses ve akustik ile ilgili bilgilendirme yapılarak ses yayılımı ve ortam malzemeleri ile ilgili detaylardan bahsedilmiş, sesin yayılımı ile ilgili formüller verilmiştir.

Yeni tasarlanan yapılarla ilgili sonuçlar sunulmadan önce literatürde yer alan bazı çalışmaların sonuçları doğrulanmıştır. Tasarlanan yeni yapıların incelenmesinde Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılmış, gerekli yazılımlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması ile ilk defa çok katmanlı panellerin tasarımında Cantor serilerinden yararlanılmıştır. Ayrıca, literatürde daha önce farklı malzeme türleri ile sadece hava ortamında çalışılmış olan Fibonacci serisi bu çalışmada hem hava hem su ortamında farklı malzeme türleri için denenmiş ve elde edilen sonuçlar, Cantor serileriyle tasarlanan panellerle kıyaslanmıştır. Katman sayıları ve malzeme yerleri değiştirilerek tasarlanan çok katmanlı yapıların akustik performansları literatüre sunulmuştur.

Tasarlanan paneller, denizaltı kaplama uygulamalarını modellemek üzere çelik malzeme üzerine uygulanarak yüzeyin ses ile etkileşim davranışı incelenmiştir. Cantor ve Fibonacci serileri ile hava ve su ortamında çalışmak üzere tasarlanan panellerin birçok farklı güncel ses yalıtım uygulamalarında kullanılabileceği gösterilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ses yalıtımı ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar öncelikle bu tasarımlarda kullanılan malzemeler, incelemelerde kullanılan yöntemler ve farklı tasarımlar üzerinedir.

Ses yalıtım uygulamalarında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin akustik performansı ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bununla birlikte katı, sıvı ve gözenekli malzemeler kullanılarak farklı alanlarda birçok yalıtım uygulamaları araştırılmış ve denenmiştir.

1947'de yapılan çalışmada gözenekli ve elastik malzemelerin akustik özelliklerini belirlemek için modeller önerilmiş ve bazı modellerin kullanılamayacağı gösterilmiştir [1]. Benzer bir çalışmada hava içeren gözenekli malzemelerde ses dalgası yayılımının dönen dalgalar için geçerli olmadığı belirtilmiş ve incelemeler için diferansiyel denklemler önerilmiştir [2].

1956 yılında Biot tarafından yapılan çalışma ile ses dalgalarının sıvı dolu gözenekli bir ortamda yayılmasını açıklayan bir teori yayınlanmıştır [3]. Çalışma ile gelen ve yansıyan ses dalgasının sonlu bir kalınlık tabakası boyunca sesin yayılmasına katkıda bulunduğu ve bütün dalgaların genliklerinin bilinmesi durumunda katmanın akustik davranışının da bilineceği gösterilmiştir. Tüm malzemeler, gelen ses için bir miktar yutucu özellik gösterse de, "akustik malzeme" terimi öncelikle yüksek emilim değerleri sağlamak için özel amaçlarla üretilmiş ve malzemelere uygulanmıştır. Ses emilimi bir yüzeye düşen ve yansıtılmayan ses enerjisinin bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır [4].

1970 yılında yapılan bir çalışmada, ortam gürültüsünü azaltmak için yalıtım malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. [5]. Gürültü emici malzemelerin, ses dalgası enerjisinin bir kısmını ısıya dönüştürerek sesi emdiği, bunun da gürültünün kontrolü için yararlı olduğu anlaşılmıştır. Fakat sadece gözenekli malzemelere özgü çalışıldığı için bu model diğer malzemelerde geçerli olmamıştır.

Özellikle çok katmanlı akustik yüzey tasarımlarında ilk olarak 1949 yılında geliştirilen Transfer Matris Metodunun kullanılmasının modellemeyi kolaylaştırması nedeniyle metot daha sonra birçok çalışmada kullanılmıştır [6, 7]. 1977 yılında Transfer Matris Metodu kullanılarak tek katmanlı katı malzeme ile sesin yayılımı incelenmiştir [7]. Çok katmanlı yapılarda her bir katman için hesaplanan transfer matrisinin çarpımı sonucu tüm yapının transfer matrisi elde edilebilmektedir.

1992 yılında yapılan bir çalışma sonucunda, gözenekli malzemelerin kullanıldığı çok katmanlı yapılarda ses iletimi için yeni bir model sunulmuştur. Gözenekli malzeme boyunca sesin yayılımı, Biot Teorisi kullanılarak açıklanmış ve matris geliştirilmiştir [8]. Çalışma sonucunda önerilen yaklaşımın katmanlı yapıların iletim kaybını iyileştirmek için kullanılabilecek bir model olduğu anlaşılmıştır. Katmanlı malzemelerde ses yayılımının modellenmesi için geliştirilen yöntemden ses iletimi ve yansımaları tahmin etmek için bir program oluşturulmuş, iki farklı katmanlı yapının incelenmesi için oluşturulan bu program kullanılmıştır [9].

Daha sonra yapılan bir çalışmada gözenekli malzeme teorisi kullanılarak iki panel arasındaki boşluğu gözenekli bir malzeme olan poliüretan köpük ile kaplayarak transfer kaybını hesaplamak üzerine çalışılmıştır [10]. Sunulan gözenekli malzeme teorisi ile köpükle kaplanmış panel yapılarında gözenekli malzeme teorisinin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Sualtı akustiği ile ilgili olarak ise 1999 yılında yapılan bir çalışmada tek ve çok katmanlı sıvılarda ses dalgalarının oluşturduğu yansıma, emilim ve iletim katsayısı ile yüzey empedansı kavramları tanımlanmış ve formüle edilmiştir [11].

2001 yılında yapılan çalışmada ses zayıflaması ve faz hızını tahmin etmek için üç farklı tip köpük ile farklı kalınlığa sahip dört konfigürasyon ele alınmış, kaplama kalınlığının ve malzeme özelliklerinin ses yalıtımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, yüksek frekanslarda ses zayıflamasının arttığı düşük frekanslarda kaplamanın hava akış direnci ve bükümü arttıkça azaldığı, kaplamanın kalınlığı arttıkça ise ses zayıflamasının da arttığı gösterilmiştir [12].

Çok katmanlı akustik materyallerin iletim kaybının tahmini için 2009 yılında geliştirilmiş edilmiş bir Transfer Matris Metodu geliştirilmiştir [13]. Daha sonra çok katmanlı yapılarda transfer matris metodunun analitik bir basitleştirmesi sunulmuş, bu basitleştirme, klasik transfer matris metodu kullanılarak yayılan güç, radyasyon verimliliği ve iletim kaybının verimli ve doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlamıştır [14]. Sonlu elemanlar yöntemi gibi daha kesin ve maliyetli yöntemler ile karşılaştırıldığında sunulan yöntemin aynı doğrulukta olduğu gösterilmiştir.

Farklı bir çalışmada ise gözenekli malzeme ile transfer matris metodu kullanılarak farklı panellerde katman kalınlığının ses iletim kaybına etkisini araştırılmıştır. Tasarlanan iki ve üç katmanlı panellerle yapılan çalışmaya göre uygun yapılar seçilirse üç katmanlı panelin

iki katmanlı panele göre düşük frekans bandında daha iyi akustik yalıtım sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca üç katmanlı panelde ses yalıtım performansını ayarlamak için köpük tabakalarının ve hava boşluklarının özelliklerinin değiştirilmesinin iki katmanlı panele göre daha etkili olduğu anlaşılmıştır [15]

Sualtında yapılan çalışmalara bir örnek olarak katmanlı yapıda malzemeler kullanılarak bir tankın üzeri takozlarla kaplanmış, takozların istenmeyen yansımaları ortadan kaldırdığı, düşük frekansta belirgin bir şekilde emilim katsayısının azaldığı ve yüksek frekansta mükemmel bir ses emici malzeme olduğu tespit edilmiştir. [16].

Sualtı ses ölçümleri için gözenekli malzeme kullanılarak yapılan bir başka çalışmada gözenekli malzemenin delik yoğunluğunun ve yansıma katsayısı için gelen ses dalgasının yüzeye geliş açısının önemli olduğu anlaşılmıştır [17].

Malzeme türlerinden ahşap, kauçuk ve çelik birleşimlerinin sualtı akustik emilim özelliklerinin belirlenmesi için de çalışma yapılmış, çelik-kauçuk kompozitin düşük yansıma katsayısına, kauçuk-çelik kompozitin ise yüksek yansıma katsayısına sahip olduğu gösterilmiştir [18]. Ahşap malzemelerin içerdiği nem miktarı arttıkça yansıma katsayısının azalma eğiliminde olduğu anlaşılmıştır.

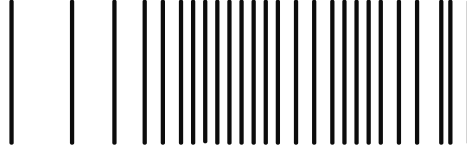
2003 yılında yapılan çalışma ile poliüretanın sualtı akustik cihazlarda kullanım için performansı incelenmiştir [19]. Hidrofonlar poliüretan ile kaplanmış, inceleme sonucunda poliüretanın sualtı akustik sensörleri için iyi bir yalıtım malzemesi olduğu sonucuna varılmıştır. Silikon kauçuğa karşılık gelen yumuşak bir malzeme ile alüminyuma karşılık gelen sert bir malzemeyi içeren simetrik ve simetrik olmayan dört farklı konfigürasyonun incelendiği diğer bir çalışmada simetrik ve simetrik olmayan periyodik birimler arasında farklılığın olduğu anlaşılmıştır [20].

Son yıllarda yapılan çalışmalara örnek olarak 2020'de sualtı akustiğinde gizlilik için kullanılan gözenekli malzemeler, rezonans malzemeleri, piezoelektrik malzemeler ve meta malzemeler incelenmiştir [21]. Gözenekli malzemenin yüksek frekanslı ses emilimi, kolay üretim ve düşük maliyet avantajlarına sahip olduğu, rezonans malzemelerin ise genel olarak dar bant özelliğine sahip olduğu ve sualtı ses emiliminde yaygın olarak kullanılmakta olduğu anlaşılmıştır. Piezoelektrik malzemelerin entegrasyonu esnasında daha fazla cihaza ihtiyaç duyduğu için sualtı ekipmanına rezonans ve gözenekli malzemelerden daha zor monte edilme dezavantajına sahip olduğu, meta malzeme olan Cloak için ise, gizlilik açısından

önemli bir performansa sahip olduğu, fakat üretimi zor ve yapısının nispeten kalın olduğu anlaşılmıştır.

3. SES VE AKUSTİK

Çağımızın gün geçtikçe artan bir sorunu olan gürültü, "hoş olmayan veya istenmeyen ses" olarak tanımlanmaktadır. Bir kişi için ses olan şey, bir başkası için gürültü olabilir. Ses veya gürültü, bir ortamdaki (örneğin hava, su veya katı) basınç değişimlerinin veya salınımlarının sonucu titreşimler halinde yayılan dalgalardır. Akustik ise hava, su ve katıda titreşim ve ses dahil olmak üzere mekanik dalgaların incelenmesiyle ilgilenen disiplinler arası bir bilim dalıdır. Mimari akustik, müzik akustiği ve sualtı akustiği gibi modern toplumun hemen hemen her alanında akustik uygulamalar bulunur. Ses, Şekil 3.1'de olduğu gibi boyuna dalgalar şeklinde yayılır.



Şekil 3.1. Ses dalgası.

Ses dalgaları, bir ses kaynağı tarafından üretilir. Ses kaynağı çevredeki ortamda titreşimler yaratır. Titreşimler kaynaktan ses hızıyla uzaklaşarak ses dalgasını oluşturur. Kaynaktan sabit bir uzaklıkta zamanla (t), ses basıncı (p) ve dalga hızının (c) değişmesiyle ses dalgası

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

şeklinde elde edilir. Ses dalgaları frekansa bağlı olarak ayırt edilebilir. Frekans saniyede oluşan titreşim sayısı olarak tanımlanmaktadır ve birimi (Hz)'dir. 20 Hz'in altı kızılötesi, 20 Hz ile 20 kHz arası akustik ve 20 kHz'in üzeri ultrason olarak bilinen ses dalgalarıdır. Akustik, insan kulağının işitilebilir frekans aralığı olan 20 Hz (veya 16 Hz) ile 20 kHz (veya 22 kHz) arasındaki titreşimler ve dalgalarla ilgilenir. Sualtı için ise frekans aralığı 10 Hz ile 1 MHz arasındadır [22].



Şekil 3.2. Ses dalgasının frekanslara göre sınıflandırılması.

Akustik dalgalar, mekanik bir bozulmanın yayılmasından kaynaklanır. Yayılma ortamının elastik özelliklerinden dolayı yerel sıkıştırmalar ve genişlemeler bir noktadan çevre noktalara iletilerek kaynaktan etrafa yayılmaktadır. Bu ortam bozulmasının yayılma hızı, ses hızı olarak adlandırılmaktadır. Ses hızı ortama bağlıdır ve malzemenin temel bir özelliğidir. Ses hızının ölçülmesine yönelik ilk önemli çalışma Newton tarafından yapılmıştır. Newton belirli bir maddedeki ses hızının, üzerine etki eden basıncın yoğunluğuna bölünerek karekökünün alınmasıyla elde edilen sonuca eşit olduğuna inanıyordu. Bunun daha sonra yanlış olduğu kanıtlandı ve Fransız matematikçi Laplace tarafından yapılan çalışma ile Eşitlik 3.2’de Newton-Laplace denklemi olarak bilinen denklem elde edilmiştir [23]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de c ses hızını (m/s), K esneklik kitle katsayısını, ρ ise yoğunluğu (m/s^2) ifade etmektedir. Ses hızı ortam koşullarına göre değişir. Örneğin gazlarda ses hızı sıcaklığa bağlıdır. Deniz seviyesinde $20\text{ }^\circ\text{C}$ havada, ses hızı yaklaşık 343 m/s ve yoğunluk 1.3 kg/m^3 olarak kabul edilmektedir. Deniz suyunda ise dalga hızı basınç, tuzluluk ve sıcaklığa bağlı olarak 1450 m/sn ile 1550 m/sn arasında değişmektedir. Fakat genellikle formüllerde 1500 m/sn olarak kullanılmaktadır. Deniz suyu yoğunluğu (ρ) aynı parametrelere bağlı olarak değişmekte ve yaklaşık değeri 1000 kg/m^3 olarak alınmaktadır.

Dalga boyu, ses dalgasının bir periyot sırasında kat ettiği mesafe olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 3.3’te λ dalga boyu (m), f frekans (s), T periyot (1/s) ve c ise ses hızıdır (m/s).

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (3.3)$$

Ses gücü, ses enerjisinin birim zamanda yayılma hızı olarak tanımlanmaktadır. Birimi ise güç olduğundan Watt'tır. Ses gücü seviyesi veya L_W (dB) [22]

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır. Eşitlik 3.4'te W_0 değeri referans, W ise ölçülen ses gücü olarak tanımlanmaktadır ve değeri 10^{-12} W olarak kullanılır. Ses ölçümünde logaritmik bir ifadenin kullanılması sayesinde çok geniş bir frekans aralığında yayılan ses dalgalarının sayısal aralığı azalmaktadır.

Ses şiddeti, bir ses dalgası tarafından taşınan birim alan başına güç olarak tanımlanmaktadır. Birim alan başına ölçülen bir değer olduğundan birimi Watt/m²'dir. Ses şiddeti seviyesi veya L_I (dB) [22]

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (3.5)$$

ile elde edilir. Eşitlik 3.5'te belirtilen I_0 değeri referans, I ise ölçülen ses şiddeti değerini ifade etmektedir.

Ses basıncı, belirli bir ortamdaki ortalama yerel basınç ile ses dalgasındaki basınç arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. İnsan kulağı çok çeşitli genliklere sahip sesleri algılayabildiğinden, ses basıncı genellikle logaritmik desibel ölçeğinde bir seviye olarak ölçülür. Ses basıncı seviyesi veya L_p (dB) [22]

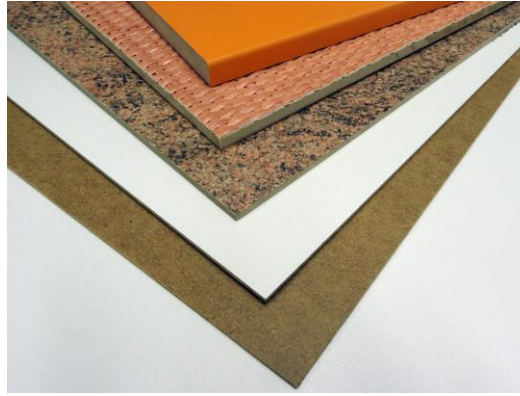
$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (3.6)$$

ile verilir. Eşitlik 3.6'da p ortalama karekök ses basıncı (Pa), p_{ref} ise referans ses basıncıdır (Pa). Standartlara göre yaygın olarak kullanılan referans ses basınçları havada 20 μPa ve suda 1 μPa 'dır [22].

3.1 Akustik Yalıtım Malzemeleri

Ses yalıtımında kullanılan malzemelerin ortak özelliği, gelen ses dalgasının bir kısmını emici özellik göstermeleridir. Ses dalgalarını emicilik kabiliyetleri frekansa, kalınlığa ve montaj yöntemine bağlı olarak değişmektedir. İstenmeyen sesleri yani gürültüyü kontrol etmek için bu malzemelerin kullanımı oldukça önemlidir.

Ses yalıtımında yüksek emilim katsayısına sahip malzemeler genellikle gözenekli malzemelerdir. Düşük frekanslarda daha az etkilidir. Gözenekli malzemelere örnek olarak lifli levhalar, yün, halılar, yalıtım battaniyeleri örnek verilebilir [24].



Şekil 3.3. Lifli levha [25].

Gözenekli malzemeler dışında plaka olarak adlandırılan gözeneksiz ve sert olmayan malzemeler de vardır. Yüksek frekans bandında ses emici malzeme olarak kullanılmakla birlikte düşük frekans bantlarında da etkilidirler. Bu malzemelere örnek olarak alçı levhalar, çelik, kauçuk, ahşap veya sunta paneller örnek verilebilir.



Şekil 3.4. Kauçuk tabanlı akustik halı [26].



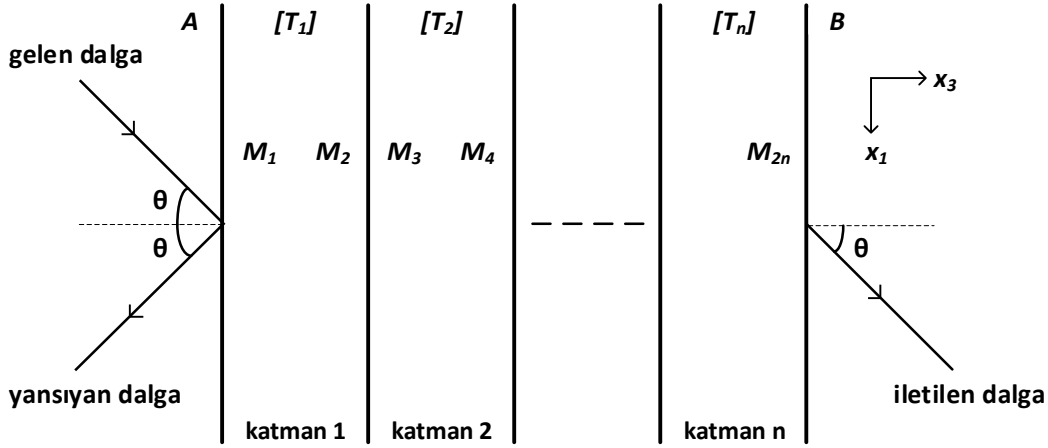
Şekil 3.5. Sunta panel [27].

3.2 Ses Yayılımının İncelenmesi

Sesin çok katmanlı yapılarda incelenmesi için farklı metotlar mevcuttur. Bunların en bilineni Transfer Matris Metodudur. Transfer Matris Metodu (TMM) [27] çok katmanlı ortamlarda özellikle elektromanyetik dalga yayılımını modellemekte kullanılan analitik bir yöntemdir ve katmanlı yapıların akustik analizlerine de uyarlanmıştır. Tasarlanan katmanlı yapı yüzeyine gelen ses dalgası parametrelerinden kullanılan malzemelerin türüne (katı, sıvı veya gözenekli) göre katman kalınlığı, yoğunluk, ses hızı vs. gibi parametrelerin girdi olarak kullanıldığı metotta çıktı olarak yansımaya katsayısı, emilim katsayısı, transfer kaybı ve yüzey empedansı gibi sonuçlar elde edilmektedir.

Şekil 3.6, θ geliş açısıyla sonlu bir kalınlığa sahip olan çok katmanlı yüzeye çarpan bir düzlem ses dalgasını göstermektedir. Yüzeye çarpan ses dalgası aynı açıyla çarptığı noktadan yansımakta ve yüzey içinde ses dalgasının bir kısmı yutulmaktadır. Yüzey içinde yutulmayan ses dalgası ise yüzey dışından iletilmektedir. Yüzeye gelen ses dalgasının yüzey

normali ile yaptığı açı, yansıyan ses dalgasının yüzey normali ile yaptığı açı ve iletilen ses dalgasının yüzey normali ile yaptığı açı birbirine eşittir. Yüzey normali x_3 , ses dalgasının ilerlediği yön ise x_1 'dir.



Şekil 3.6. Çok katmanlı ortamda gelen, yansıyan ve iletilen ses dalgası.

Katmanlar arasındaki ses dalgasının yayılımı transfer matrisi $[T]$ ile Eşitlik 3.7'deki gibi tanımlanmaktadır [29]

$$V(M_n) = [T] V(M_{n+1}) \quad (3.7)$$

Formülde belirtilen M_n ve M_{n+1} noktaları, Şekil 3.6'da katmanlarda belirtilen noktalardır. $V(M_n)$ ve $V(M_{n+1})$ vektör bileşenleri, M_n ve M_{n+1} noktalarındaki akustik alanları tanımlamaktadır.

Gelen ses dalgasının yüzeye çarptığı bölge olan A'nın yüzey empedansı Eşitlik 3.8'de formüle edilmiştir. A bölgesi katı, sıvı veya gözenekli malzeme olabilir.

$$Z_A = \frac{p(A)}{v_3(A)} \quad (3.8)$$

Formülde Z_A yüzey empedansını, $v_3(A)$ A ortamında gelen ses dalgası hızının normal bileşenini, $p(A)$ ise A yüzeyinde oluşan basıncı ifade etmektedir.

B bölgesindeki yüzey empedansını hesaplamak için havanın karakteristik empedansından yararlanılmaktadır. Eşitlik 3.9'da verilen formüle göre Z_B yüzey empedansını, Z_C ise havanın karakteristik empedansını ifade etmektedir. B bölgesi hava olarak kabul edildiğinde B noktasındaki yüzey empedansı [29]

$$Z_B = \frac{Z_C}{\cos(\theta)} = \frac{p(B)}{v_3(B)} \quad (3.9)$$

şeklinde elde edilir. Son katman olarak hava yerine farklı malzeme kullanıldığında formül ve hesaplama değişmektedir.

3.3 Ses Dalgasının Farklı Ortamlarda Yayılımı

Ses dalgasının yayılım özellikleri ortamın katı, sıvı ya da gözenekli olmasına göre değişmektedir ve ayrı ayrı incelenmektedir.

3.3.1 Sıvı Ortamda Ses Dalgası Yayılımı

Sıvı katmanda boylamsal dalga yayılımı mevcut iken enlemsel dalga yayılımı mevcut değildir ve iki boylamsal dalga mevcuttur. Boylamsal dalgalardan biri x_3 yönünde A ortamına gelen ses dalgası diğeri ise B ortamından yansıyan dalgadır. Sıvı katmandaki transfer matrisi belirlemede kullanılan A ve B sınırındaki hız ve basıncın x_3 yönündeki bileşenlerini içeren denklemler Eşitlik 3.10 ve 3.11'de verilmiştir [29, 31].

$$p(x_3) = A_1 \exp(-jk_3x_3) + A_2 \exp(jk_3x_3) \quad (3.10)$$

$$v_3^f(x_3) = \frac{k_3}{\omega\rho} [A_1 \exp(-jk_3x_3) - A_2 \exp(jk_3x_3)] \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.10 ve 3.11’de k_3 , A ortamından yüzeye gelen ses dalga sayısının x_3 yönündeki bileşenini ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi verilir

$$k_3 = \sqrt{k^2 - k^2 \sin^2 \theta} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12’de verilen k

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir. Sıvı katmanda M_1 ve M_2 sınırları arasındaki bağlantı, hız ve basıncın normal bileşenleri ($v_3(M_1)$, $p(M_1)$) ve transfer matrisi (T_f) kullanılarak transfer matrisi Eşitlik 3.14’te ifade edilmiştir [29]

$$\begin{Bmatrix} p(M_1) \\ v_3(M_1) \end{Bmatrix} = T_f \begin{Bmatrix} p(M_2) \\ v_3(M_2) \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

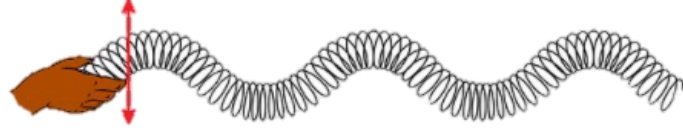
Katman kalınlığı l olan sıvı bir katmanın transfer matrisi Eşitlik 3.15’teki gibi 2x2 matris [29]

$$[T_f] = \begin{bmatrix} \cos k_3 l & j \frac{\omega \rho}{k_3} \sin k_3 l \\ j \frac{k_3}{\omega \rho} \sin k_3 l & \cos k_3 l \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

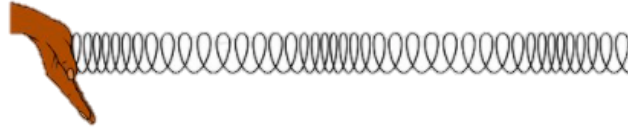
ile ifade edilir. Malzeme sıvı olduğundan dolayı transfer matrisi “F” ile gösterilir. Matriste ρ sıvı katmanın yoğunluğunu ifade etmektedir. 20 °C sıcaklık ve 101.3 kPa basınç altında hava sıvı olarak kabul edilmektedir.

3.3.2 Katı Ortamda Ses Dalgası Yayılımı

Katı katmanda hem enlemsel hem de boylamsal olmak üzere dört farklı dalga mevcuttur. Dört farklı dalgadan iki tanesi enlemsel iki tanesi boylamsal dalga olmakla birlikte dalgalardan biri gelen dalga diğeri ise yansıyan dalgadır.



(a)



(b)

Şekil 3.7. (a) Enlemsel dalga ve (b) boylamsal dalga [30].

Katı katmanda akustik alanı ifade etmek için Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 17’de verilen denklem kullanılmaktadır. Boylamsal dalganın potansiyeli φ , enine dalganın potansiyeli ise ψ ile ifade edilmektedir ve dalga x_3 yönünde yayılmaktadır [29, 31].

$$\varphi = [A_1 \exp(-jk_{p3}x_3) + A_2 \exp(jk_{p3}x_3)] \exp(j\omega t - jk_1x_1) \quad (3.16)$$

$$\psi = [A_3 \exp(-jk_{s3}x_3) + A_4 \exp(jk_{s3}x_3)] \exp(j\omega t - jk_1x_1) \quad (3.17)$$

Formüllerde verilen k_{p3} x_3 yönünde ilerleyen boylamsal dalga sayısını, k_{s3} ise x_3 yönünde ilerleyen enlemsel dalga sayısını ifade etmektedir.

Katı katmanda M_1 ve M_2 sınırları arasındaki bağlantı, hız ve gerilme tensörünün normal ve teğet bileşenleri ile transfer matrisi (T_s) kullanılarak Eşitlik 3.18'deki gibi ifade edilmiştir. σ_{33} yüzeye dik ilerleyen gerilme tensörü ve σ_{13} yüzeye teğet ilerleyen gerilme tensörü olarak tanımlanmaktadır. $v_1(M_1)$ ve $v_3(M_1)$ ise, x_1 ve x_3 yönündeki hız bileşenleri olarak ifade edilmektedir. Malzeme katı olduğundan dolayı transfer matrisi "s" ile ifade edilmektedir [29].

$$\begin{Bmatrix} v_1(M_1) \\ v_3(M_1) \\ \sigma_{33}(M_1) \\ \sigma_{13}(M_1) \end{Bmatrix} = T_s \begin{Bmatrix} v_1(M_2) \\ v_3(M_2) \\ \sigma_{33}(M_2) \\ \sigma_{13}(M_2) \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

Transfer matrisi katı malzemeler için 4x4 boyutunda bir matris olup, malzemenin sınır noktalarındaki $\Gamma_s(x_3)$ değerlerinin $x_3 = 0$ ve $x_3 = l$ için çarpımı sonucu [29]

$$T_s = \Gamma_s(0) * \Gamma_s(l)^{-1} \quad (3.19)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\Gamma_s(x_3)$ değeri [29]

$$\Gamma_s(x_3) = \begin{bmatrix} \omega k_1 \cos(k_{p3}x_3) & -j\omega k_1 \sin(k_{p3}x_3) & j\omega k_{s3} \sin(k_{s3}x_3) & -\omega k_{s3} \cos(k_{s3}x_3) \\ -j\omega k_{p3} \sin(k_{p3}x_3) & \omega k_{p3} \cos(k_{p3}x_3) & \omega k_1 \cos(k_{s3}x_3) & -j\omega k_1 \sin(k_{s3}x_3) \\ -D_1 \cos(k_{p3}x_3) & jD_1 \sin(k_{p3}x_3) & jD_2 k_{s3} \sin(k_{s3}x_3) & -D_2 k_{s3} \cos(k_{s3}x_3) \\ jD_2 k_{p3} \sin(k_{p3}x_3) & -D_2 k_{p3} \cos(k_{p3}x_3) & \mu(k_{s3}^2 - k_1^2) \cos(k_{s3}x_3) & -j\mu(k_{s3}^2 - k_1^2) \sin(k_{s3}x_3) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

ile verilir. Eşitlik 3.20'de verilen denklemde dalga sayısı olan k_{s3} , k_{p3} ve k_1 değerleri ile D_1 ve D_2 değerleri [29, 32]

$$k_1 = \frac{\omega}{c} \sin \theta = k \sin \theta \quad (3.21)$$

$$k_p = \frac{\omega}{c_p} \sin \theta \quad (3.22)$$

$$k_s = \frac{\omega}{c_s} \sin \theta \quad (3.23)$$

$$k_{p3} = \sqrt{k_p^2 - k_1^2} \quad (3.24)$$

$$k_{s3} = \sqrt{k_s^2 - k_1^2} \quad (3.25)$$

$$D_1 = \lambda (k_1^2 + k_{p3}^2) + 2\mu k_{p3}^2 \quad (3.26)$$

$$D_2 = 2\mu k_1 \quad (3.27)$$

ile bulunur. Eşitlik 3.24 ve 3.25'te verilen k_{p3} boylamsal dalga sayısını ifade ederken k_{s3} ise enlemsel dalga sayısını ifade etmektedir. Her iki dalga sayısı x_3 yönünde ilerleyen dalgalar için geçerlidir. Eşitlik 3.22 ve Eşitlik 3.23'te belirtilen c_p boylamsal dalgalar için dalga hızını ifade ederken c_s ise enlemsel dalgalar için dalga hızını ifade etmektedir. c_p ve c_s ise [29, 32]

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.28)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik 3.30 ve 3.31’de yer alan ve Lamé katsayıları olarak bilinen λ ve μ , Young modülünden (E) ve Poisson oranından (ν) türetilmiştir ve aşağıdaki gibi ifade edilir [29, 33].

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.30)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.31)$$

Young modülü, katı bir malzemenin sertliğinin bir ölçüsüdür ve malzemeleri karakterize etmek için kullanılan bir özelliktir. Poisson oranı veya Poisson katsayısı ise bir malzeme gerildiğinde oluşan enine gerilmenin boyuna gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır.

3.3.3 Gözenekli Ortamda Ses Dalgası Yayılımı

Gözenekli malzeme katı ve sıvı malzemeden oluşmaktadır. Gözenekli malzeme içindeki sıvı katman standart sıcaklık ve basınçta hava olarak kabul edilmektedir. Gözenekli katmanda ses dalgasının yayılımı ile ilgili çalışmalar Biot Teorisi ile başlatılmıştır [34]. Biot Teorisine göre oluşturulan gözenekli katmanda modelinde, iki adet boylamsal dalga ile bir adet enlemsel dalganın yayılımı söz konusudur. İki adet boylamsal dalga ve bir adet enlemsel dalga sayısına ait formüller [29]

Boylamsal dalga 1 için:

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Delta}] \quad (3.32)$$

Boylamsal dalga 2 için:

$$\delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} + \sqrt{\Delta}] \quad (3.33)$$

Enlemsel dalga için:

$$\delta_3^2 = \frac{\omega^2}{N} \left(\frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{22}} \right) \quad (3.34)$$

ile verilir. Eşitlik 3.32 ve Eşitlik 3.33'te verilen Δ ifadesi ise

$$\Delta = [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12}]^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2) \quad (3.35)$$

ile bulunur. Gözenekli katmanda transfer matrisi, dalga hızı ile gerilme tensörü bileşenleri arasındaki bağlantı sonucu Eşitlik 3.36'daki gibi ifade edilmektedir. Gözenekli katmanda iki adet boylamsal dalga ile bir adet enlemsel dalganın yansıması ile oluşan üç adet yansıyan dalga oluşmaktadır [29].

$$\begin{Bmatrix} v_1^s(M_1) \\ v_3^s(M_1) \\ v_3^f(M_1) \\ \sigma_{33}^s(M_1) \\ \sigma_{13}^s(M_1) \\ \sigma_{33}^f(M_1) \end{Bmatrix} = T_p \begin{Bmatrix} v_1^s(M_2) \\ v_3^s(M_2) \\ v_3^f(M_2) \\ \sigma_{33}^s(M_2) \\ \sigma_{13}^s(M_2) \\ \sigma_{33}^f(M_2) \end{Bmatrix} \quad (3.36)$$

Eşitlik 3.36'da, $v_1^s(M_1)$ gözenekli katman içinde yer alan katı bileşende oluşan enlemsel dalga hızını ifade ederken, $v_3^s(M_1)$ katı bileşenden oluşan boylamsal dalga hızını ifade etmektedir. $v_3^f(M_1)$ ise gözenekli katman içinde yer alan sıvı bileşende oluşan boylamsal dalga hızını ifade etmektedir. $\sigma_{33}^s(M_1)$ katı bileşendeki normal gerilme tensörünü, $\sigma_{13}^s(M_1)$

katı bileşendeki teğet gerilme tensörünü ve $\sigma_{33}^f(M_1)$ sıvı bileşendeki normal gerilme tensörünü ifade etmektedir.

Gözenekli katmanda transfer matrisi malzemenin sınır noktalarındaki $\Gamma_p(x_3)$ değerlerinin çarpımı sonucu [29]

$$T_p = \Gamma_p(0) * \Gamma_p(l)^{-1} \quad (3.37)$$

şeklinde elde edilmektedir. Eşitlik 3.37'de verilen $\Gamma_p(x_3)$ değerinin formülü [29]

$$[\Gamma_p(x_3)] = \begin{bmatrix} \omega k_t \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{13}x_3) & \omega k_t \cos(k_{23}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{23}x_3) & j\omega k_{33} \sin(k_{33}x_3) & -\omega k_{33} \cos(k_{33}x_3) \\ -j\omega k_{13} \sin(k_{13}x_3) & \omega k_{13} \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_{23} \sin(k_{23}x_3) & \omega k_{23} \cos(k_{23}x_3) & \omega k_t \cos(k_{33}x_3) & -j\omega k_t \sin(k_{33}x_3) \\ -j\omega k_{13} \mu_1 \sin(k_{13}x_3) & \omega k_{13} \mu_1 \cos(k_{13}x_3) & -j\omega k_{23} \mu_2 \sin(k_{23}x_3) & \omega k_{23} \mu_2 \cos(k_{23}x_3) & \omega k_t \mu_3 \cos(k_{33}x_3) & -j\omega k_t \mu_3 \sin(k_{33}x_3) \\ -D_1 \cos(k_{13}x_3) & jD_1 \sin(k_{13}x_3) & -D_2 \cos(k_{23}x_3) & jD_2 \sin(k_{23}x_3) & 2jNk_t k_{33} \sin(k_{33}x_3) & -2Nk_t k_{33} \cos(k_{33}x_3) \\ 2jNk_t k_{13} \sin(k_{13}x_3) & -2Nk_t k_{13} \cos(k_{13}x_3) & 2jNk_t k_{23} \sin(k_{23}x_3) & -2Nk_t k_{23} \cos(k_{23}x_3) & N(k_{33}^2 - k_t^2) \cos(k_{33}x_3) & -jN(k_{33}^2 - k_t^2) \sin(k_{33}x_3) \\ -E_1 \cos(k_{13}x_3) & jE_1 \sin(k_{13}x_3) & -E_2 \cos(k_{23}x_3) & jE_2 \sin(k_{23}x_3) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

ile verilir. $i = 1, 2$ iken

$$D_i = (P + Q\mu_i)(k_t^2 + k_{i3}^2) - 2Nk_t^2 \quad (3.39)$$

$$E_i = (R\mu_i + Q)(k_t^2 + k_{i3}^2) \quad (3.40)$$

şeklinde hesaplanır. Boylamsal dalga için katı bileşenin sıvı bileşene olan hız oranı (μ_i) ve enlemsel dalga için sıvı bileşenin katı bileşene olan hız oranını (μ_3) ifade eden formüller $i = 1, 2$ için [29]

$$\mu_i = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2 \rho_{11}}{\omega^2 \rho_{12} - Q\delta_i^2} \quad (3.41)$$

$$\mu_3 = -\frac{\rho_{12}}{\rho_{22}} \quad (3.42)$$

ile verilir. Eşitlik 3.43'te verilen k_t her katman için aynı olan teğet dalga sayısını ifade etmektedir ve

$$k_t = \frac{\omega}{c} \sin(\theta) \quad (3.43)$$

ile hesaplanır. Elastik katsayıları ifade eden P, Q ve R değerleri Biot Teorisine göre aşağıdaki gibi verilmektedir [29, 34]

$$P = \frac{4}{3}N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi} K_f \quad (3.42)$$

$$Q = K_f (1 - \phi) \quad (3.43)$$

$$R = \phi K_f \quad (3.44)$$

Formüllerdeki K_b (MPa) ve K_f (MPa) değerleri hacimsel modülü ifade ederken, ϕ gözeneklilik katsayısını, N (MPa) ise gözenekli malzemenin kayma modülünü ifade etmektedir.

Biot Teorisinde bahsedilen eylemsizlik katsayıları ρ_{11} , ρ_{12} ve ρ_{22} ise aşağıdaki gibi elde edilir [29]

$$\rho_{11} = \rho_1 + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (3.45)$$

$$\rho_{12} = -\rho_a + j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (3.46)$$

$$\rho_{22} = \phi\rho_0 + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (3.47)$$

Yukarda verilen denklemlerde gözenekli katman yoğunluğu ρ_a , gözenekli malzemedeki hava yoğunluğu ρ_0 ile ifade edilmektedir. Ayrıca yukarda belirtilen formüllerde yer alan $G(\omega)$ ve ρ_a [29, 35]

$$G(\omega) = \left(1 + \frac{4j\alpha^2\eta\rho_0\omega}{\sigma^2\Lambda^2\phi^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.48)$$

$$\rho_a = \rho_0\phi(\alpha - 1) \quad (3.49)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik 3.48’de verilen α bükümlülüğü, σ hava akış direncini, Λ viskozite boyutunu, η viskozite katsayısını ifade etmektedir.

3.4 Ses Dalgasının Çok Katmanlı Ortamlarda Yayılımı

Ses dalgasının tek katmanlı ortamlarda yayılımı bir önceki bölümde anlatılırken bu bölümde çok katmanlı ortamlarda yayılımı ve katmanlar arasındaki sınır koşullarını oluşturan arayüz matrisleri anlatılmıştır. Çok katmanlı panelde her bir katmanın transfer matrislerinin çarpımı sonucu toplam transfer matrisi elde edilmektedir. Tasarlanan çok katmanlı panellerin sadece kalınlıkları hesaba katılırken diğer boyutlar sonsuz olarak alınmıştır.

Ses dalgasının çok katmanlı ortamlarda yayılımının gösterildiği Şekil 3.6’da katman malzemeleri katı, sıvı veya gözenekli olabilir. Katman malzeme tipine ve sınır koşullarına göre arayüz matrisleri oluşturulmaktadır. Arayüz matrisleri I ve J ile ifade edilmektedir.

Farklı malzeme türlerinin bir araya gelerek oluşturduğu çok katmanlı panellerde sınır koşul denklemleri ve arayüz matrisleri yan yana gelen malzeme türüne göre değişmektedir. Şekil 3.6’da verilen çok katmanlı panele göre alt index a ve b katman türünü belirtmekle birlikte ve katı (s), sıvı (f) ve gözenekli (p) olarak ifade edilmektedir. Çok katmanlı panelde hava katmanından (f) katı, sıvı veya gözenekli bir katmana geçişini içeren arayüz matrisi [29, 36]

$$I_{f,a} \cdot V(M_A) + J_{f,a} V(M_1) = 0, \quad a \in \{s, f, p\} \quad (3.50)$$

şeklinde verilmiştir. Katı, sıvı veya gözenekli bir katmandan katı, sıvı veya gözenekli katmana geçişi içeren arayüz matrisi Eşitlik 3.51’de verilmiştir [29, 36].

$$I_{a,b} \cdot V(M_i) + J_{a,b} V(M_{i+1}) = 0, \quad a, b \in \{s, f, p\} \quad i=1,2,3,..,2n \quad (3.51)$$

Son katman olan n katmanından B ortamına geçişi içeren arayüz matrisi [29, 36]

$$I_{a,b} \cdot V(M_{2n}) + J_{a,b} V(M_B) = 0, \quad a, b \in \{s, f, p\} \quad i=1,2,3,..,2n \quad (3.52)$$

şeklinde ifade edilir.

Çok katmanlı panellerde iki farklı katman malzemesi ile oluşturulan panellere ait sınır koşullarını sağlayan denklemler ve arayüz matrisleri aşağıda sırasıyla verilmiştir [29, 35].

- 1) Sıvı-sıvı katman şeklinde oluşan çok katmanlı panelde sınır koşullarını oluşturan denklemler

$$p(M_2) = p(M_3) \quad (3.53)$$

$$v_3^f(M_2) = v_3^f(M_3) \quad (3.54)$$

şeklinde verilir. Sıvı-sıvı katman için arayüz matrisleri

$$[I_{f,f}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$[J_{f,f}] = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

şeklinde elde edilir. f, f ifadesi sıvı katmandan sıvı katmana geçişi tanımlamaktadır.

2) Katı-katı şeklinde oluşan çok katmanlı panelde sınır koşullarını oluşturan denklemler

$$\sigma_{33}^s(M_2) = \sigma_{33}^s(M_3) \quad (3.57)$$

$$\sigma_{13}^s(M_2) = \sigma_{13}^s(M_3) \quad (3.58)$$

$$v_3^s(M_2) = v_3^s(M_3) \quad (3.59)$$

$$v_1^s(M_2) = v_1^s(M_3) \quad (3.60)$$

ile ifade edilir. Katı-katı katman için arayüz matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir

$$[I_{s,s}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$[J_{s,s}] = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

3) Gözenekli-gözenekli şeklinde oluşan çok katmanlı panelde sınır koşullarını oluşturan denklemler

$$v_1^s(M_2) = v_1^s(M_3) \quad (3.63)$$

$$v_3^s(M_2) = v_3^s(M_3) \quad (3.64)$$

$$\phi_{M_2} \left(v_3^f(M_2) - v_3^s(M_2) \right) = \phi_{M_3} \left(v_3^f(M_3) - v_3^s(M_3) \right) \quad (3.65)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) + \sigma_{33}^f(M_2) = \sigma_{33}^s(M_3) + \sigma_{33}^f(M_3) \quad (3.66)$$

$$\sigma_{13}^s(M_2) = \sigma_{13}^s(M_3) \quad (3.67)$$

$$\frac{\sigma_{33}^f(M_2)}{\phi_{M_2}} = \frac{\sigma_{33}^f(M_3)}{\phi_{M_3}} \quad (3.68)$$

şeklinde verilir. Gözenekli-gözenekli katman için arayüz matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir

$$[I_{p,p}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

$$[J_{p,p}] = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{\phi_{M_3}}{\phi_{M_2}}\right) \frac{\phi_{M_3}}{\phi_{M_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \left(1 - \frac{\phi_{M_3}}{\phi_{M_2}}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\phi_{M_3}}{\phi_{M_2}} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

- 4) Katı-sıvı şeklinde oluşan çok katmanlı panelde sınır koşullarını oluşturan denklemler aşağıdaki gibidir.

$$v_3^s(M_2) = v_3^f(M_3) \quad (3.71)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) = -p(M_3) \quad (3.72)$$

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

Gözenekli-gözenekli katman için arayüz matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$[I_{s,f}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$$[J_{s,f}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

- 5) Katı-gözenekli şekilde oluşan çok katmanlı panelde sınır koşullarını oluşturan denklemler aşağıdaki gibidir.

$$v_1^s(M_2) = v_1^s(M_3) \quad (3.75)$$

$$v_3^s(M_2) = v_3^s(M_3) = v_3^f(M_3) \quad (3.76)$$

$$\sigma_{33}^s(M_2) = \sigma_{33}^s(M_3) + \sigma_{33}^f(M_3) \quad (3.77)$$

(gözenekli malzemelerin hem katı hem sıvı bileşeni olduğu unutulmamalıdır.)

$$\sigma_{13}^s(M_2) = \sigma_{13}^s(M_3) \quad (3.78)$$

Katı-gözenekli katman için arayüz matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$[I_{s,p}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

$$[I_{s,p}] = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

6) Sıvı-gözenekli şekilde oluşan çok katmanlı panelde sınır koşullarını oluşturan denklemler

$$v_3^f(M_2) = (1 - \phi_{M_3})v_3^s(M_3) + \phi_{M_3}v_3^f(M_3) \quad (3.81)$$

$$-(1 - \phi_{M_3})p(M_2) = \sigma_{33}^s(M_3) \quad (3.82)$$

$$0 = \sigma_{13}^s(M_3) \quad (3.83)$$

$$-\phi_{M_3}p(M_2) = \sigma_{33}^f(M_3) \quad (3.84)$$

şeklinde elde edilir. Sıvı-gözenekli katman için arayüz matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$[I_{f,p}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \phi_{M_3} & 0 \\ (1 - \phi_{M_3}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

$$[J_{f,p}] = \begin{bmatrix} 0 & (1 - \phi_{M3}) & \phi_{M3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

Katı ve gözenekli katmandan oluşan çok katmanlı panelin arayüz matrisleri

$$[I_{p,s}] = [J_{s,p}] \quad \text{veya} \quad [J_{p,s}] = [I_{s,p}] \quad (3.87)$$

şeklinde yer değiştirebilir. Bir katmandan diğer katmana geçmek için sınır koşullarını oluşturan arayüz matrisleri ve denklem setlerinin birleşimi sonucu oluşan D matrisi ve V_D vektörü arasındaki ilişki Eşitlik 3.88'de verilmiştir.

$$D \cdot V_D = 0 \quad (3.88)$$

Son katmanın katı ya da sıvı olmasına göre değişen V_D vektörü gerilme tensörü ve hız bileşenleri ile oluşturulmuştur. Son katman sıvı ise V_D vektörü Eşitlik 3.89'daki gibidir. D matrisi ise Eşitlik 3.90'da ifade edildiği gibidir [36]

$$V_D = \{p(A) \quad v^f(A) \quad V(M_2) \quad V(M_4) \dots V(M_{2n}) \quad p(B) \quad v^f(B)\}^T \quad (3.89)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{12} & D'_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & D_{23} & D'_{23} & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & D_{(m-1)(n-1)} & D'_{(m-1)(n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & D_{(m)(n)} & D'_{(m)(n)} \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

Formülde $D_{m,n} = I_{m,n}$ ve $D'_{m,n} = J_{m,n} \cdot T_i$ şeklinde ifade edilmektedir. m ve n ardışık iki katmanı, i ise katman sayısını ifade etmektedir.

[D] matrisi katman sınırları içerisindeki yapıyı içermektedir. Çok katmanlı panelin ilk ve son katman sınırının dışındaki noktaların karakteristik yüzey empedanslarının da bilinmesi gerekmektedir. Karakteristik yüzey empedansları [D] matrisine eklenerek çok katmanlı panelin genel transfer matrisi elde edilmektedir. Son katman ile sınırın dışındaki ortamın katı ya da sıvı olmasına göre arayüz matrisi değişmektedir. Sınırın dışındaki ortam sıvı ise arayüz matrisi $J_{m,f}$ olarak ifade edilmektedir. Ortam katı ise arayüz matrisi $J_{m,s}$ olarak ifade edilmektedir. Son katmanın dışındaki ortamında katı, sıvı veya gözenekli olması durumunda hız bileşeni sıfırdır [29].

$$\text{Dış ortam katı ise: } [J_{m,s}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Dış ortam sıvı ise: } [J_{m,f}] = [0 \ 1]$$

$$\text{Dış ortam gözenekli ise: } [J_{m,p}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Sınır koşulu ise

$$\frac{Z_B}{\cos\theta} = \frac{p(B)}{v_3^f(B)} \quad (3.91)$$

şeklinde verilir. Son katmanın dışındaki ortamın katı olması durumunda sınır koşul denklemi

$$v_3^s(B) = v_1^s(B) = 0 \quad (3.92)$$

ile verilir. Son katman ile son katmanın dışındaki ortamın sınır koşulları $[D]$ matrisi sonuna satır olarak eklenerek $[D']$ matrisi elde edilir. Son katman dışındaki ortamın sıvı olması durumunda $[D']$ matrisi Eşitlik 3.93'teki gibi ifade edilmektedir.

$$[D'] = \begin{bmatrix} & & [D] & & \\ 0 & \dots & 0 & -1 & \frac{Z_B}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

İlk katman ve ilk katman öncesi ortam arasındaki sınır koşulları $[D]$ matrisinin ilk satırına eklenerek $[D'']$ matrisi elde edilir. $[D'']$ matrisi

$$[D''] = \begin{bmatrix} -1 & Z_A & 0 & \dots & 0 \\ \hline & [D'] & & & \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

şeklinde elde edilmektedir. Eşitlik 3.95'teki Z_A , Şekil 3.6'da verilen A katmanının normal yüzey empedansını belirtmektedir. Z_A bilinmeyen olup

$$Z_A = \frac{p(A)}{v_3^f(A)} \quad (3.95)$$

şeklinde ifade edilir. Z_A 'yı elde etmenin bir diğer yöntemi ise determinanı sıfıra eşitlemektir. Eşitlik 3.89'da verilen ifadede V_D vektörü ile $[D'']$ matris çarpımının determinanı sıfıra eşitlenerek Z_A

$$Z_A = \frac{|D''_1|}{|D''_2|} \quad (3.96)$$

denklemleri ile elde edilmektedir. Eşitlik 3.96'da verilen $|D'_1|$ ifadesi $[D']$ matrisinin ilk sütunu çıkarılarak elde edilen matrisin determinantı iken $|D'_2|$ ifadesi ise $[D']$ matrisinin ikinci sütunu çıkarılarak elde edilen yeni matrisin determinantıdır.

A katmanının yüzey empedansı Z_A , yansımaya ve emilim katsayısı, transfer kaybı gibi akustik parametrelere girdi olduğundan hesaplanması sonucu bu parametreler elde edilmektedir.

Havanın karakteristik empedans (Z_c) değeri genellikle 415 *rayls* olarak alınır. Son katman hava ise havanın karakteristik empedansı (Z_c) ile B katmanının yüzey empedansı (Z_B) arasındaki $Z_B = \left(\frac{Z_c}{\cos\theta}\right)$ ilişkisine bağlı olarak A noktasındaki yansımaya katsayısı elde edilir [29].

Gelen ses dalgasının bir kısmı malzeme içinde emilir. Yansımaya katsayısının hesaplanması ile emilim katsayısı (α) aşağıda belirtilen formüle göre elde edilmektedir.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.97)$$

ile ifade edilmektedir. Bu noktada ses yalıtımı ve ses emilimi arasındaki farkı açıklamak faydalı olabilir. Ses emilimi yansıtılmayan yüzeye gelen ses enerjisinin oran veya yüzde olarak ifade edilmesidir. Bu sebeple ses kaynağının olduğu ortamdaki akustik performansı etkileyen bir özelliktir. Ses yalıtımı ise bir ortamdan bitişikteki diğer ortama ses iletimini azaltmayı sağlar. Bu sebeple bütün bir ortamın özelliği niteliğindedir.

Yansımaya katsayısı (R), yansıyan ses dalgasının basınç değerinin gelen ses dalgasının basınç değerine oranı iken iletim katsayısı (T), ise iletilen ses dalgasının basınç değerinin gelen ses dalgasının basınç değerine oranı olarak bilinmektedir. İletim katsayısı (T), basınç değerleri arasındaki ilişkiye göre ifade edildiğinde [29]

$$\frac{P(A)}{1+R} = \frac{P(B)}{T} \quad (3.98)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik 3.93'te verilen oran $[D']$ matrisinin ilk satırına yukarıda belirtilen oran eklenerek $[D''']$ matrisi elde edilmektedir. $[D''']$ matrisinin determinantının sıfıra eşitlenmesiyle iletim katsayısı Eşitlik 3.99'da verildiği gibi elde edilmektedir [29].

$$[D'''] = \begin{bmatrix} T & 0 & \dots & -(1+R) & 0 \\ \hline & & & [D'] & \end{bmatrix} V_D = 0 \quad (3.99)$$

$$T = (1+R) \frac{\det[D'_7]}{\det[D'_1]} \quad (3.100)$$

Eşitlik 3.100'de verilen $\det[D'_7]$ ifadesi $[D']$ matrisinin yedinci sütunu, $\det[D'_1]$ ifadesi ise birinci sütunu çıkartılarak elde edilen yeni matrislerin determinantıdır [29].

Birimi desibel (dB) olan transfer kaybı (TL) ise iletim katsayısının girdi olarak kullanıldığı bir akustik parametredir.

$$TL = -20 \log_{10}(T) \quad (3.101)$$

Transfer kaybı ses yalıtımının hesaplanmasında önemlidir ve ses yalıtımının artırılması durumunda transfer kaybının yüksek olması beklenmektedir.

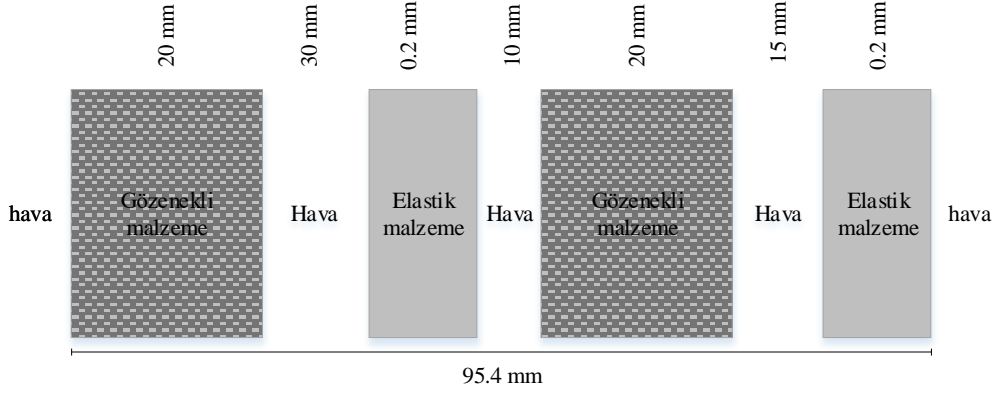
4. ÇOK KATMANLI PANELLER İÇİN BAZI LİTERATÜR SONUÇLARI VE DOĞRULANMASI

Bu bölümde literatürde daha önce sunulmuş bazı sonuçlar [37], bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen yazılımla doğrulanmıştır. Seçilen panellerde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

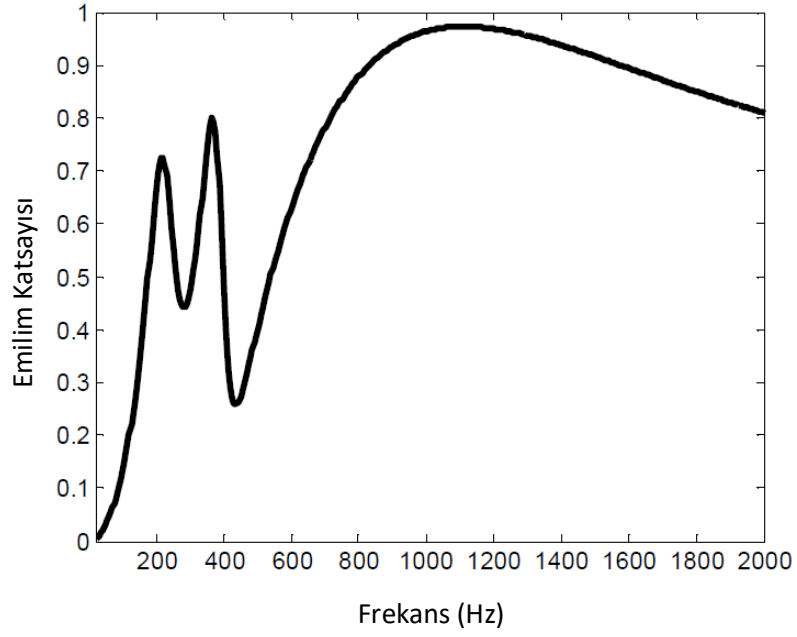
Tablo 4.1. Test edilen üç farklı malzemenin akustik temel özellikleri [37]

Malzeme Parametreleri	Hava	Gözenekli Malzeme	Elastik Malzeme
Yoğunluk	1.21 kg/m ³	100 kg/m ³	7700 kg/m ³
Ses Hızı	343 m/s		
Young Modülü			2.16e11 N/m ²
Poisson Oranı			0.27
Hava Akış Direnci		30000 rayls/m	
Gözeneklilik		0.95	
Bükümlülük		1.1	
Viskozite Boyutu		3.7 x 10 ⁻⁵ m	
Termal Boyutu		1.96 x 10 ⁻⁴ m	

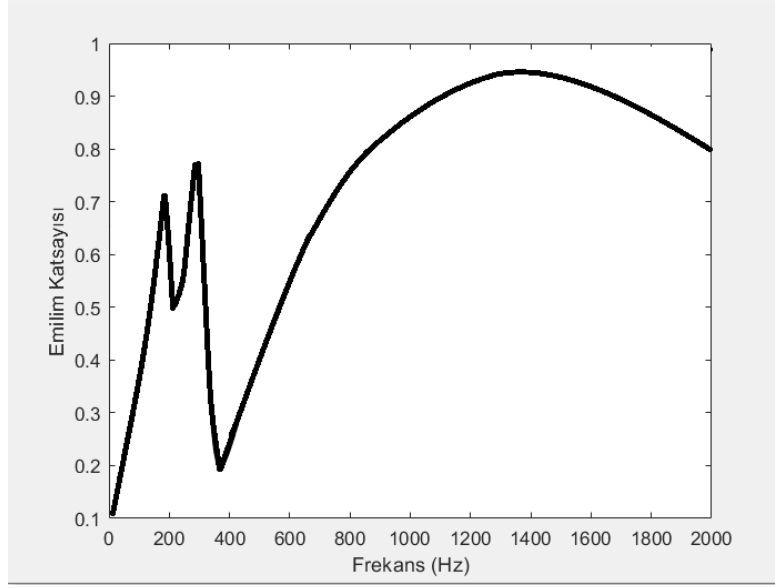
Kıyaslanan ilk panel yapısı Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu çalışmada literatürden sağlanan sonuçlarla bu çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te emilim katsayısı ve transfer kaybı için kıyaslanmış, bütün frekans aralıkları için sonuçların uyumlu olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Literatürden sağlanan gözenekli-hava-elastik-hava-gözenekli-hava-elastik katman dizilimine sahip çok katmanlı panel.

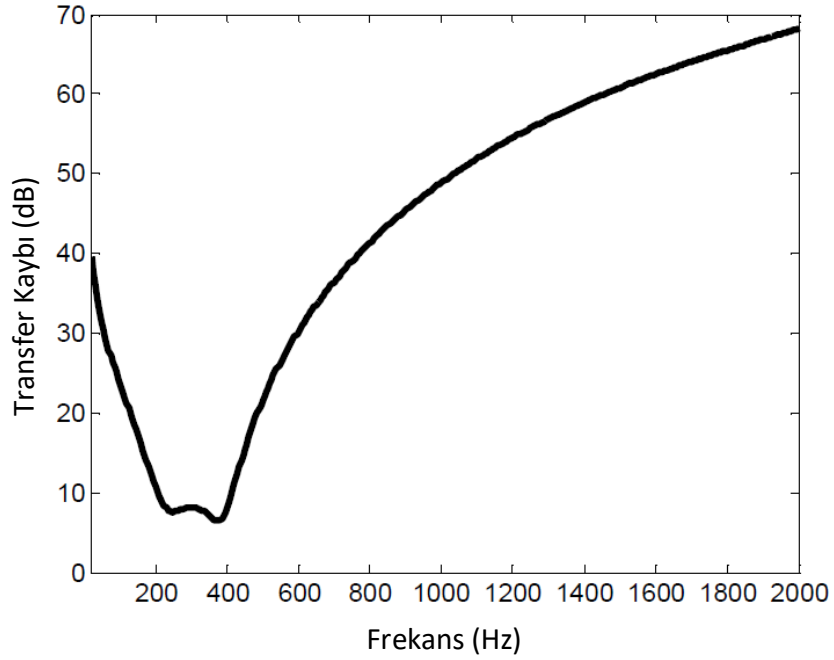


(a)

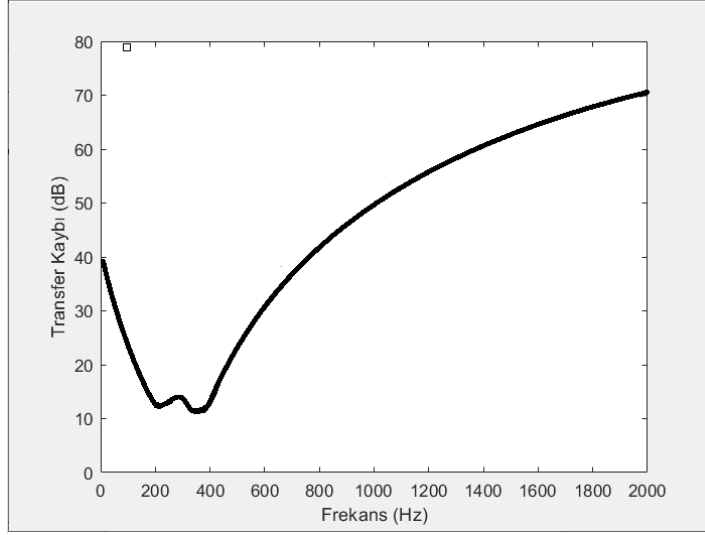


(b)

Şekil 4.2. (a) Literatürden sağlanan gözenekli-hava-elastik-hava-gözenekli-hava-elastik katman dizilimine sahip çok katmanlı panel için emilim katsayısı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.



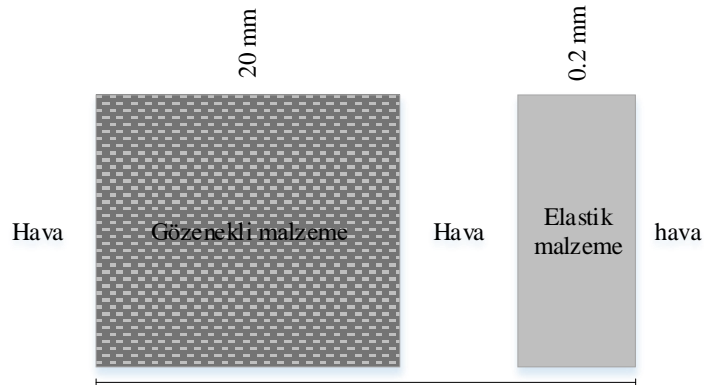
(a)



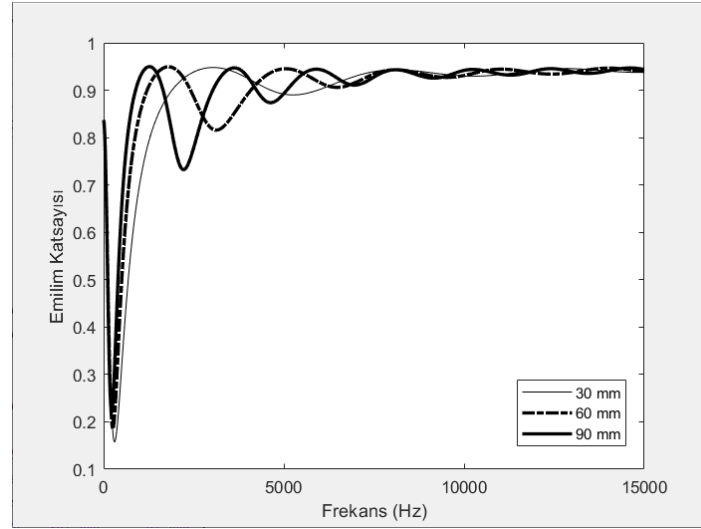
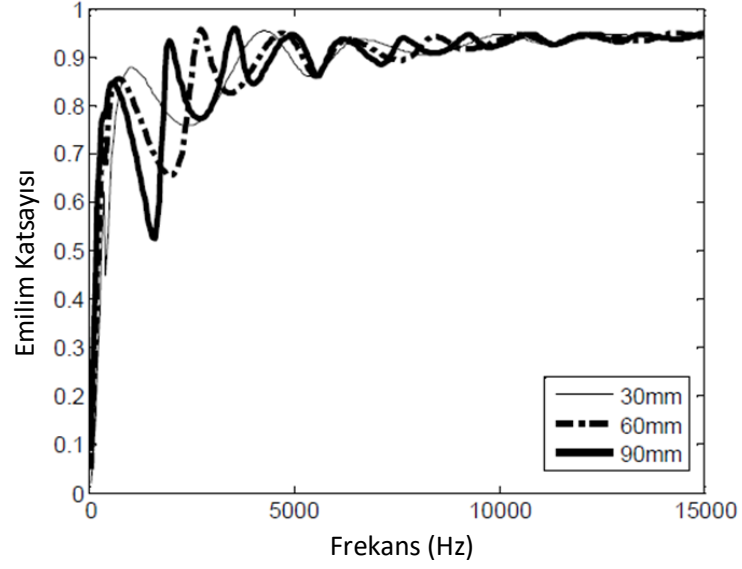
(b)

Şekil 4.3. (a) Literatürden sağlanan gözenekli-hava-elastik-hava-gözenekli-hava-elastik katman dizilimine sahip çok katmanlı panel için transfer kaybı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.

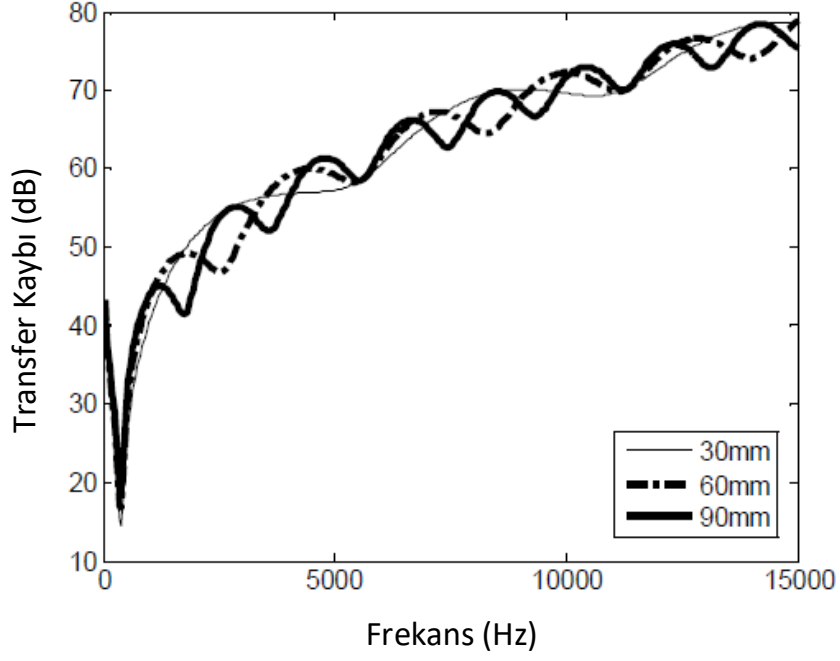
Ayrıca Şekil 4.4'te verilen çok katmanlı panel yapısı için de hava katmanının farklı katman kalınlıklarına (30 mm, 60 mm, 90 mm) göre elde edilen emilim katsayısı ve transfer kaybı sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Geniş frekans aralığında oldukça iyi uyum elde edilmiş, 0 Hz civarındaki fark ise bu bölgedeki sonuçların kararsız olmasıyla açıklanmıştır. Gözenekli ve elastik malzeme için katman kalınlıkları Tablo 4.1'de verilen kalınlıklar ile aynıdır.



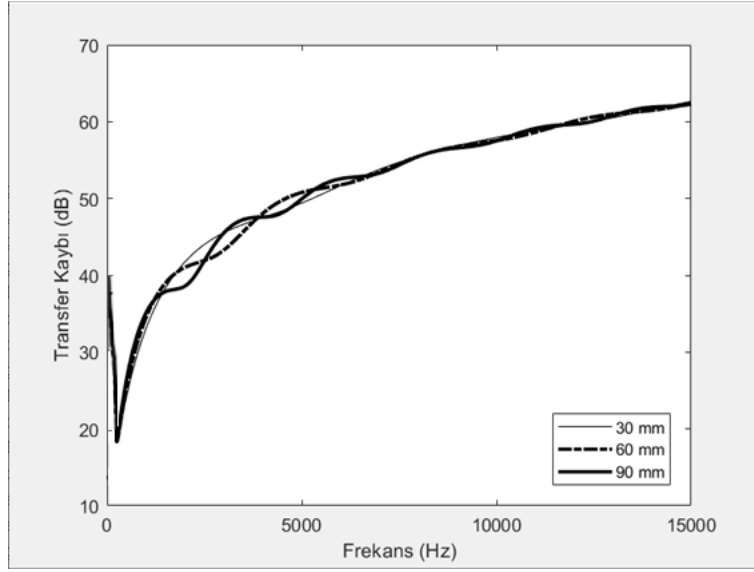
Şekil 4.4. Literatürden sağlanan çok katmanlı gözenekli-hava-elastik dizilimine sahip çok katmanlı panel [37].



Şekil 4.5. (a) Literatürden sağlanan çok katmanlı gözenekli-hava-elastik dizilimine sahip çok katmanlı panel için emilim katsayısı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.



(a)



(b)

Şekil 4.6. (a) Literatürden sağlanan çok katmanlı gözenekli-hava-elastik dizilimine sahip çok katmanlı panel için transfer kaybı sonuçları [37] (b) Aynı panel için elde edilen teorik sonuçlar.

Özetle, literatürden sağlanan sonuçlarla bu çalışmada geliştirilen algoritma ile sağlanan sonuçlar büyük ölçüde uyumaktadır.

5. ÇOK KATMANLI PANELLERİN TASARIM VE ANALİZİ

Bu tez çalışmasında Cantor ve Fibonacci seri dizilimine sahip çok katmanlı akustik paneller tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan Cantor serisinin akustik panel tasarımına uygulanması literatür için yenidir. Fibonacci serileri ise daha önce gözenekli malzemeler kullanılarak hava ortamında akustik panel tasarımlarına uygulanmış olmakla birlikte bu çalışmada dört, beş ve altıncı kuşaklarının farklı malzeme türleri ile akustik panel tasarımına uygulanması ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir [38]. Sonuçlar, TMM kullanılarak MATLAB yazılımı ile elde edilmiştir.

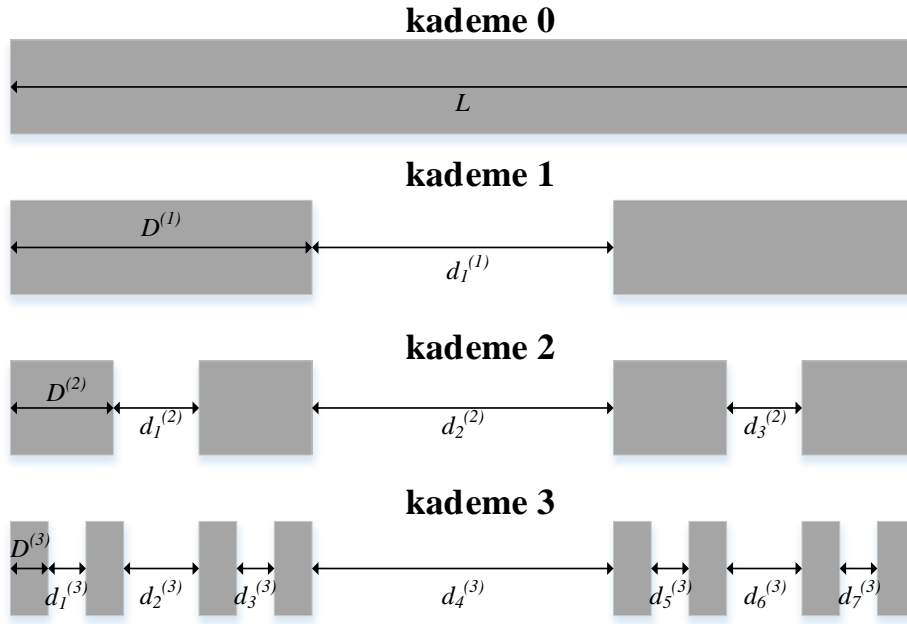
5.1 Hava Ortamında Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımları

Bu bölümde tasarlanan Cantor ve Fibonacci dizilimli çok katmanlı paneller hava ortamında incelenmiş ve performansları farklı yapısal parametreler için gösterilerek kıyaslanmıştır. Tasarımlarda elastik ve gözenekli malzemeler kullanılmıştır.

5.1.1 Cantor Seri Dizilimli Çok Katmanlı Panel Tasarımları

Çok katmanlı panel tasarımında ilk defa kullanılan Cantor serisi fraktal yapıda olup benzer yapıların ortadaki üçte birlik kısmın kaldırılması ve ardından kalan parçalarla aynı işlemin tekrarlanmasıyla elde edilmektedir. Cantor serisinde farklı kademelerin üretilmesi işlemi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, Cantor serisinin ilk üç kademesine göre tasarlanan çok katmanlı panellerde elastik ve gözenekli malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ait özellikler Tablo 5.1'de verilmiştir. Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilim yapılmış ve her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm alındığında oluşan malzeme dizilim sırası Şekil 5.2 - 5.4'te verilmiştir.

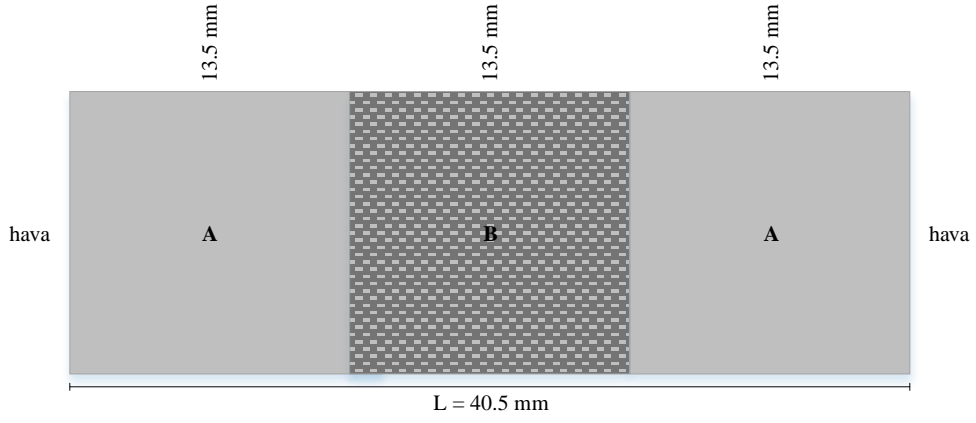


Şekil 5.1. Cantor serisinde farklı kademelerin üretilmesi.

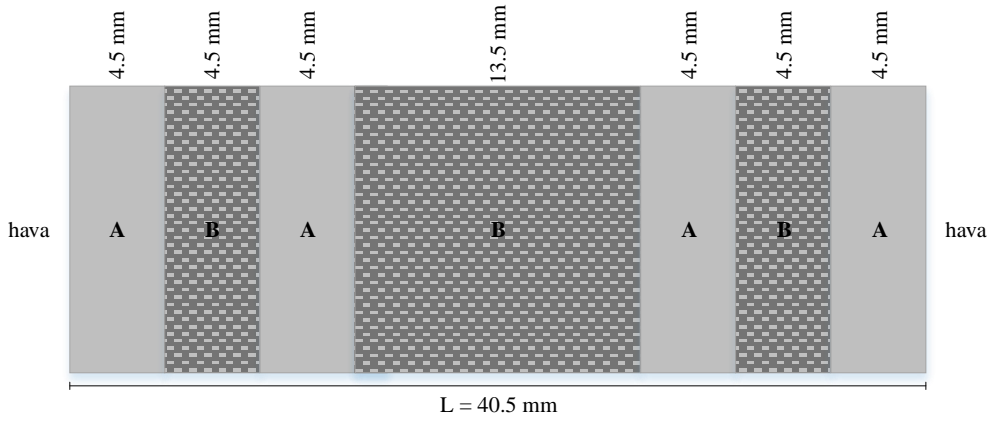
Tablo 5.1. Akustik panel tasarımında kullanılan elastik ve gözenekli malzemelerin temel özellikleri.

Elastik Malzeme		Gözenekli Malzeme	
Yoğunluk	7700 kg/m ³	Yoğunluk	100 kg/m ³
Young Modülü	2.16e11 N/m ²	Hava Akış Direnci	30000 rayls/m
Poisson Oranı	0.27	Gözeneklilik	0.95
		Bükümlülük	1.1
		Viskozite Boyutu	3.7 x 10 ⁻⁵ m
		Termal Boyutu	1.96 x 10 ⁻⁴ m

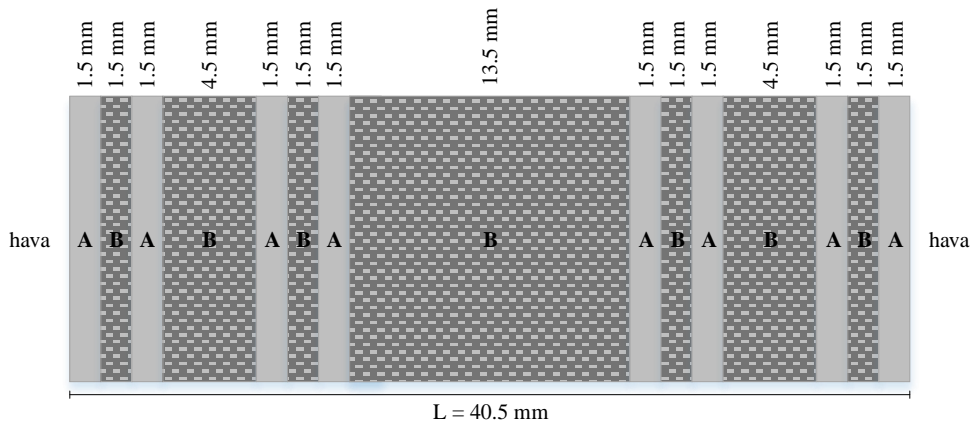
Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilim yapılmış ve her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm alındığında oluşan dizilim sırası Şekil 5.2 - 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.2. Cantor serisi kademe 1 dizilim yapısı.



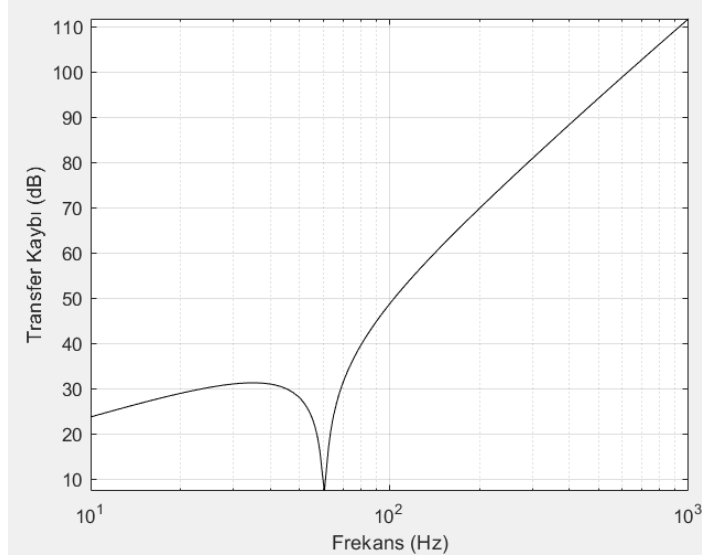
Şekil 5.3. Cantor serisi kademe 2 dizilim yapısı.



Şekil 5.4. Cantor serisi kademe 3 dizilim yapısı.

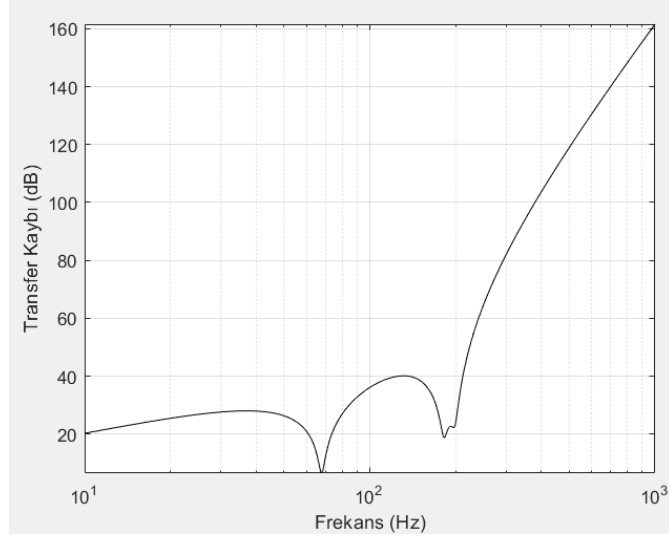
5.1.1.1 Elastik (A) - Gözenekli Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel

Bu bölümde Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilimi yapılmış, her bir katmanın toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.2 - 5.4'te verilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybına ait grafik sonuçları Şekil 5.5 - 5.7'de normal geliş durumu için verilmiştir.



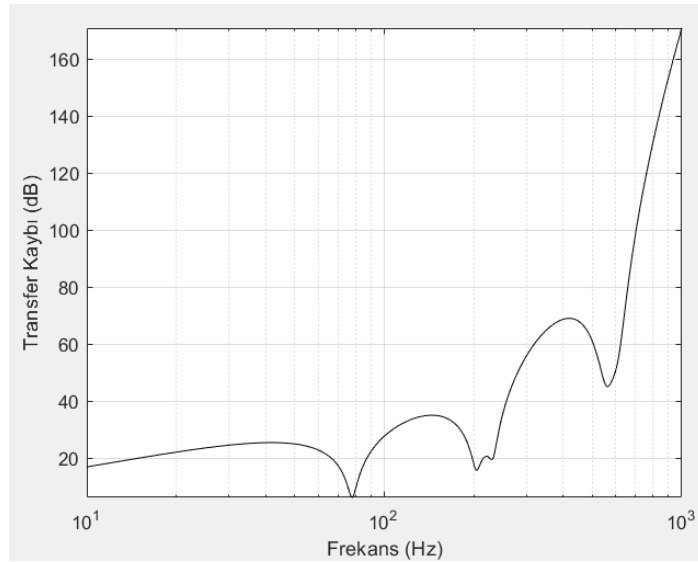
Şekil 5.5. Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı.

Şekil 5.5'de kademe 1 panelinin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değişimi gösterilmektedir. Panelin rezonans frekans değeri 60 Hz civarındadır. Rezonans frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 110 dB civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı.

Şekil 5.6'da kademe 2 panelinin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değişimi gösterilmektedir. Panelin rezonans frekans değeri 67 Hz civarındadır. 144 Hz ve 192 Hz civarında yeni minimum noktalar oluşmaktadır. 192 Hz frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 165 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen 5. kuşak panelinde katman sayısı arttığı için kayıp artmaktadır.

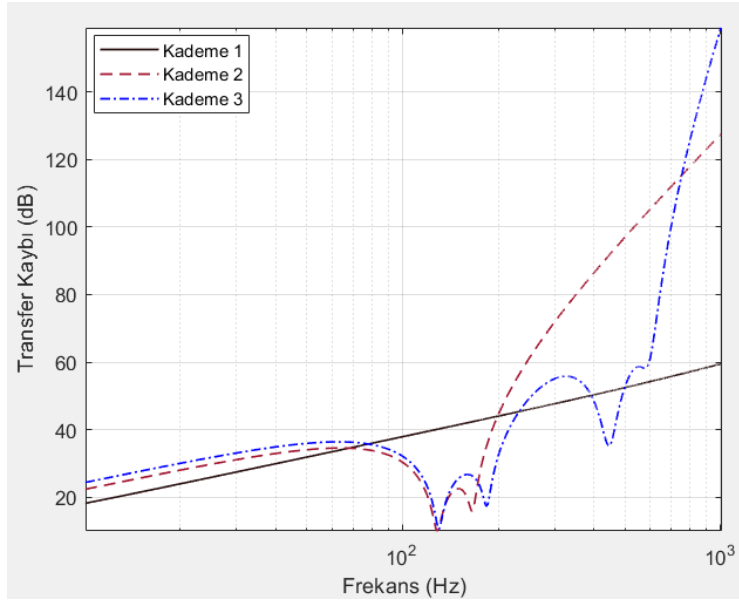


Şekil 5.7. Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı.

Şekil 5.7’de kademe 3 panelinin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değişimi gösterilmektedir. Panelin rezonans frekans değeri 79 Hz civarındadır. 205 Hz, 230 Hz ve 560 Hz civarlarında yeni minimum noktalar oluşmaktadır. 560 Hz frekansından itibaren kaybın tamamen arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 170 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen kademe 3 panelinde katman sayısı arttığı için kayıp artmaktadır.

5.1.1.2 Gözenekli (A) - Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel

Bu bölümde Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilimi yapılmış (önceki tasarımdan farklı olarak malzemeler yer değiştirilmiş), her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.2 - 5.4’te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.8’de normal geliş durumu için verilmiştir.



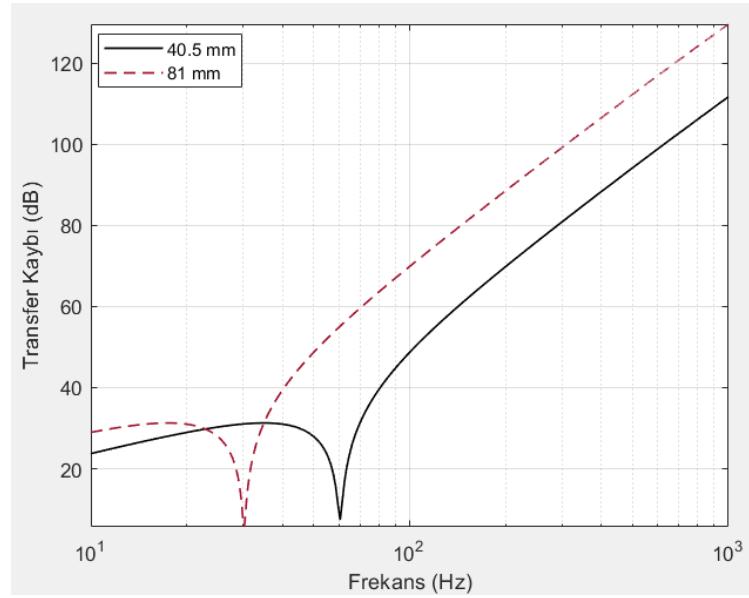
Şekil 5.8. Cantor serisi farklı kademelere göre transfer kaybı.

Şekil 5.8’de, L = 40.5 mm durum için A ve B katman malzemeleri (A= gözenekli ve B= elastik malzeme) yer değiştirildiğinde, kademe 1- kademe 3 panellerinin transfer kayıplarının frekansla değişimleri gösterilmektedir. Kademe 1 için minimum noktaların

kaybolduğu, 1000 Hz'de 60 dB civarında kayıp sağlandığı ve grafiğin doğrusal artan davranış gösterdiği gözlenmiştir. Kademe 2 ve kademe 3 panelleri için, minimum nokta sayısı daha azdır ve kademe 2 panelinin transfer kaybı özelliği kademe 3 paneline göre daha kararlıdır. dB cinsinden maksimum TL, kademe 2 ve kademe 3 için sırasıyla 126 dB ve 157 dB civarında elde edilmektedir.

5.1.1.3 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 81 mm Olan Panel

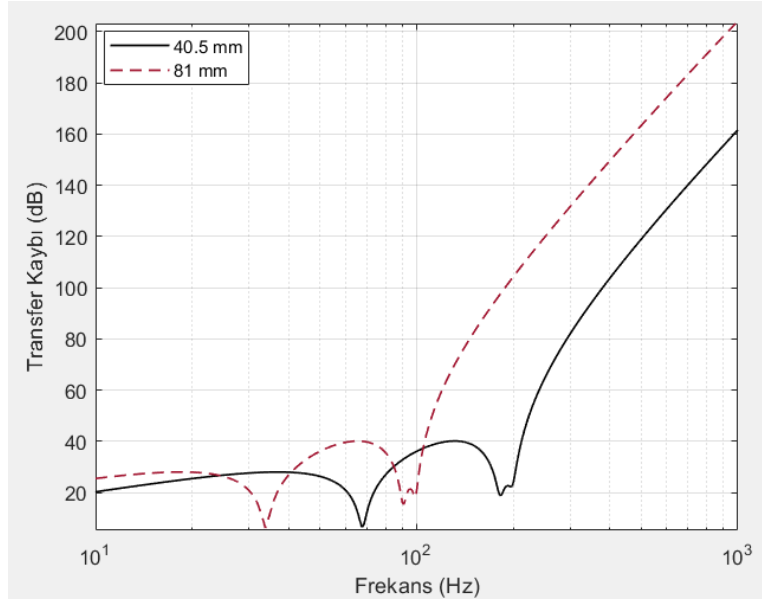
Bu bölümde Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilimi yapılmış, her birinin toplam kalınlığı 81 mm (önceki tasarımların iki katı) olan ve Şekil 5.2 - 5.4'te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.9 - 5.11'de normal geliş durumu için verilmiştir.



Şekil 5.9. Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı farkı.

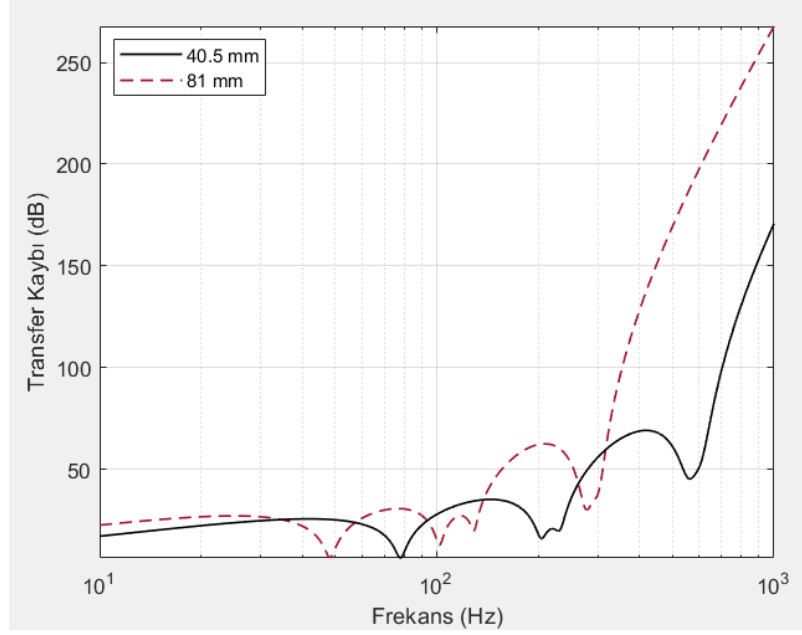
Şekil 5.9'da kademe 1 panelinin iki farklı kalınlık değeri için transfer kaybı davranışı gösterilmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 60 Hz'den 30 Hz'e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görölmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 85 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla

birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 20 dB'dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı 25 dB - 30 dB civarındadır.



Şekil 5.10. Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı farkı.

Şekil 5.10'da kademe 2 panelinin iki farklı kalınlık değeri için transfer kayıpları gösterilmektedir. $L = 40,5$ mm ve $L = 81$ mm durumlar için rezonans frekanslarının sırasıyla 67 Hz ve 33 Hz civarında olduğunu gösterilmektedir. Bu frekanslar civarında kademe 2 yapısının transfer kayıpları minimumdur. Kademe 2 panelinin toplam kalınlığının iki katına çıkması sonucu 300 Hz - 1000 Hz aralığında kayıp miktarının yaklaşık 40 dB arttığını görülmektedir. Toplam kalınlığın aynı olduğu kademe 1 ile kademe 2 paneli karşılaştırıldığında daha fazla katmana sahip kademe 2 panelinin daha iyi kayıp özelliği gösterdiği de görülmektedir. Bu durumda 90 Hz ve 180 Hz civarında yeni minimum noktalar oluşmaktadır. Ses frekansı rezonans frekanslarının altında ise transfer kaybı 23 dB - 27 dB civarındadır.



Şekil 5.11. Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı farkı.

Şekil 5.11'de kademe 3 panelinin iki farklı kalınlık değeri için transfer kayıpları gösterilmektedir. $L = 81$ mm durumunda, transfer kaybı 48 Hz ve 101 Hz'de neredeyse sıfıra eşittir ve $L = 40.5$ mm durumda, transfer kaybı 79 Hz'de minimumdur. Kademe 2 paneline benzer şekilde, transfer kaybı frekansla birlikte artmaktadır. 565 Hz'den itibaren kayıp için sürekli artış gözlenmektedir. İnce ve kalın paneller için dB'deki kayıp farkı 100 dB civarındadır. Bu sonuçlar, kademe 3 panelinin özellikle kalın yapılar için daha önemli bir yalıtım performansı sergilediğini göstermektedir.

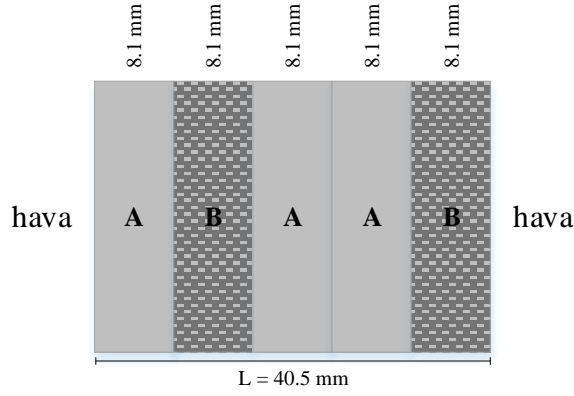
5.1.2 Fibonacci Seri Dizilimli Çok Katmanlı Panel Tasarımları

Fibonacci serisi çok katmanlı panellerin diziliminde kullanılan ve yinelemeli olarak sıralanan bir dizilimdir. Fibonacci serisi kuşağı $j > 1$ olmak koşuluyla $S_j = \{S_{j-1}, S_{j-2}\}$ kuralına göre özyinelemeli olarak üretilmektedir. Seri $S_0 = \{B\}$ ve $S_1 = \{A\}$ ile başlamaktadır ve $S_2 = \{AB\}$, $S_3 = \{ABA\}$, $S_4 = \{ABAAB\}$ şeklinde dizilime devam etmektedir. Tablo 5.2'de Fibonacci serisinin farklı kuşaklara göre katman sayısı ve dizilimi gösterilmiştir.

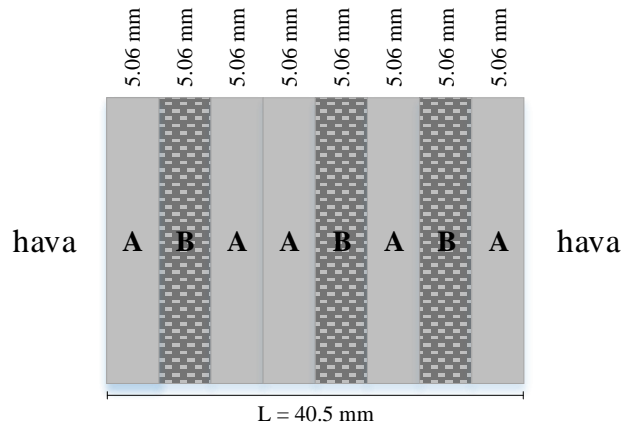
Tablo 5.2. Fibonacci Serisinin Kuşaklara Göre Katman Sayısı ve Dizilimi

Fibonacci Serisi Kuşakları	Katman Sayısı	Katman Dizilimi
S ₀	1	B
S ₁	1	A
S ₂	2	AB
S ₃	3	ABA
S ₄	5	ABAAB
S ₅	8	ABAABABA
S ₆	13	ABAABABAABAAB

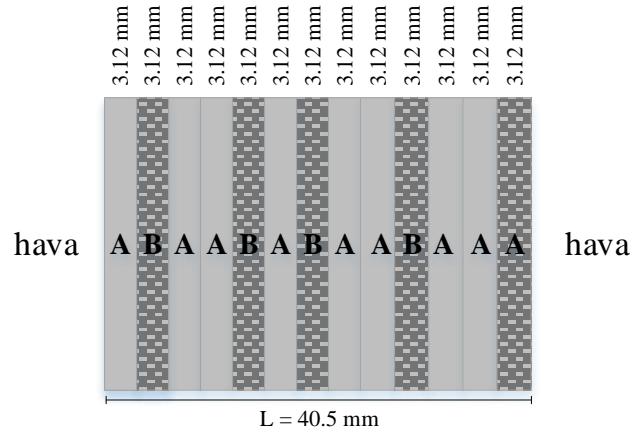
Bu bölümde Fibonacci serisi denemelerinde kullanılacak olan dördüncü, beşinci ve altıncı kuşağa ait katman dizilim sırası Şekil 5.12 – 5.14’te verilmiştir.



Şekil 5.12. Fibonacci serisi 4. kuşak dizilim yapısı.



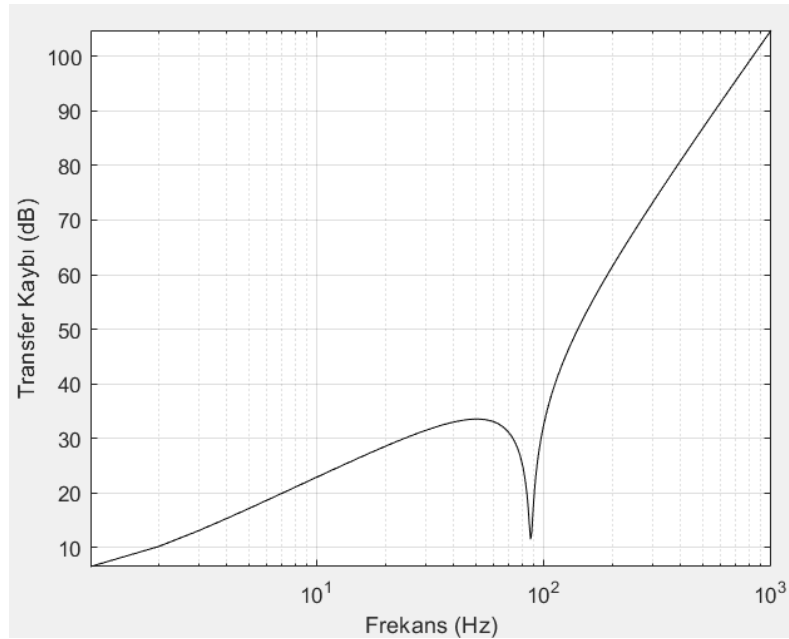
Şekil 5.13. Fibonacci serisi 5. kuşak dizilim yapısı.



Şekil 5.14. Fibonacci serisi 6. kuşak dizilim yapısı.

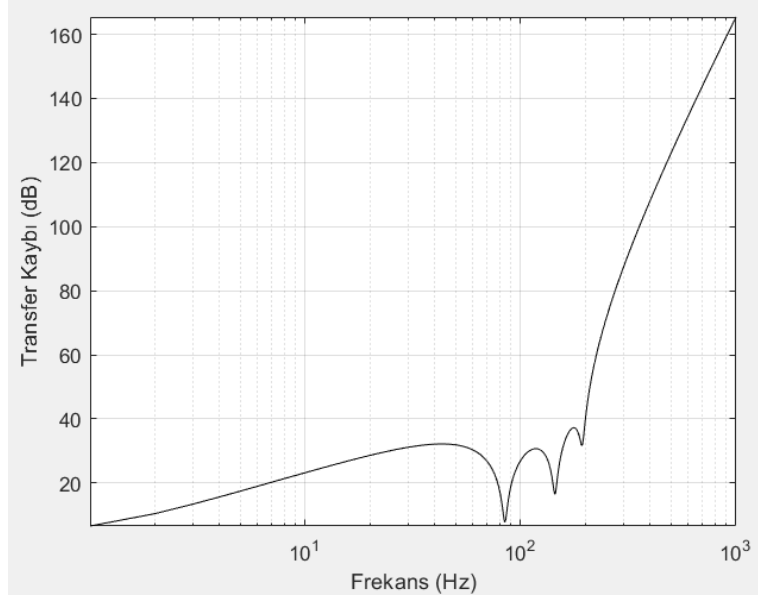
5.1.2.1 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel

Bu bölümde Fibonacci serisinin dört, beş ve altıncı kuşaklarına göre dizilim yapılmış, her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.12 – 5.14’te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.15 - 5.17’de normal geliş durumu için verilmiştir.



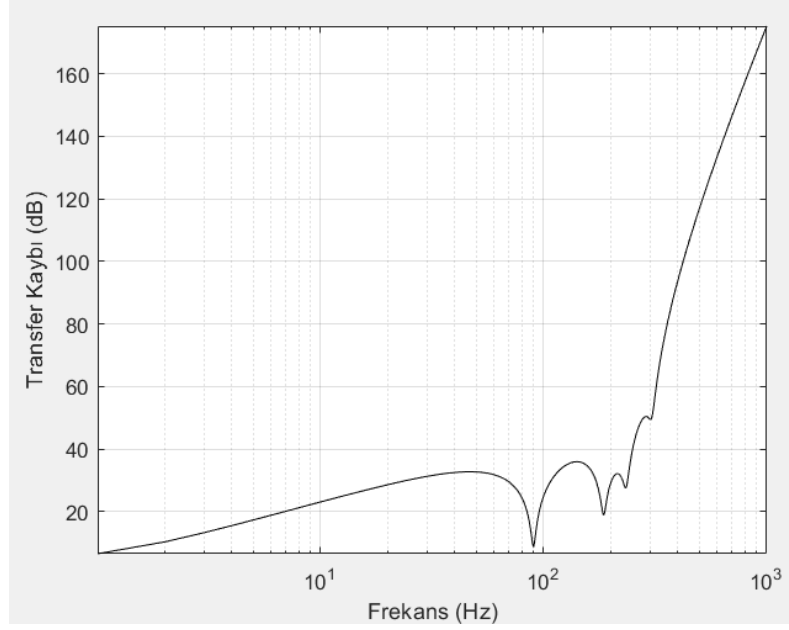
Şekil 5.15. Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı.

Şekil 5.15'te 4. kuşak panelin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değişimi gösterilmektedir. Panelin rezonans frekans değeri 87 Hz civarındadır. Rezonans frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 104 dB civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı.

Şekil 5.16'da 5. kuşak panelin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değişimi gösterilmektedir. Panelin rezonans frekans değeri 84 Hz civarındadır. 180 Hz ve 197 Hz civarında yeni minimum noktalar oluşmaktadır. 197 Hz frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 160 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen kademe 2 panelinde katman sayısı arttığı için kayıp artmaktadır.

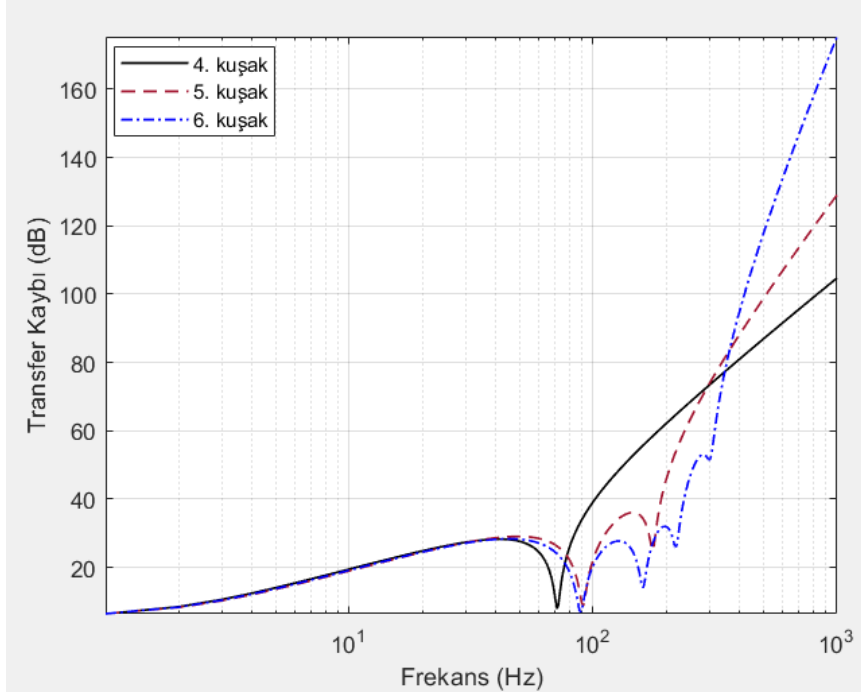


Şekil 5.17. Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı.

Şekil 5.17’de 6. kuşak panelin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için rezonans frekans değeri 90 Hz civarındadır. 185 Hz ve 233 Hz civarlarında yeni minimum noktalar oluşmaktadır. 305 Hz frekansından itibaren kaybın tamamen arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 175 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen 6. kuşak panelin katman sayısı arttığı için kayıp artmıştır.

5.1.2.2 Gözenekli (A) – Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel

Bu bölümde Fibonacci serisinin dört, beş ve altıncı kuşaklarına göre dizilim yapılmış (önceki tasarımdan farklı olarak malzemeler yer değiştirilmiştir), her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve 5.12 – 5.14’te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.18’de normal geliş durumu için verilmiştir.



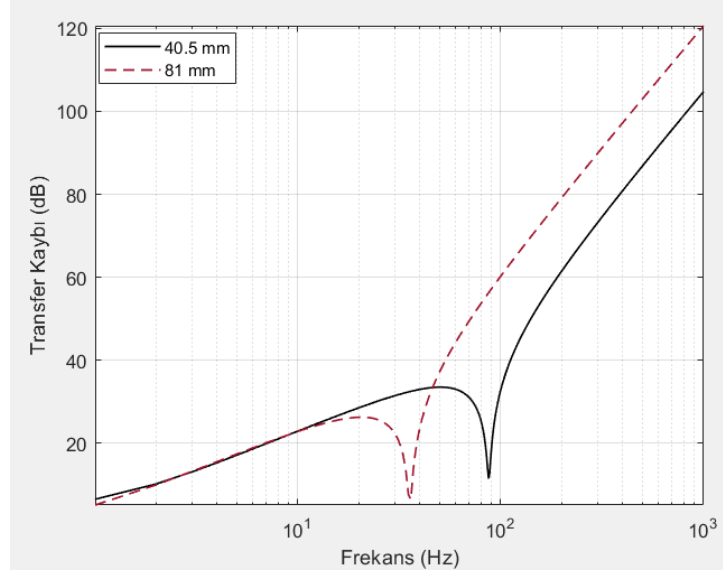
Şekil 5.18. Fibonacci serisi farklı kuşaklara göre transfer kaybı.

Şekil 5.18'de, L = 40.5 mm durum için A ve B katman malzemeleri yer değiştirildiğinde, 4. kuşak - 6. kuşak panellerinin transfer kayıplarının frekansla değişimleri gösterilmektedir. 4. kuşak için rezonans frekansının 87 Hz'den 71 Hz'e düştüğü, kaybın ise 1000 Hz civarında 104 dB olduğu görülmektedir. 5. kuşak panelinde rezonans frekansının 84 Hz'den 90 Hz'e yükseldiği, minimum noktaların azaldığı ve sadece 176 Hz civarında minimum nokta olduğu görülmektedir. 1000 Hz civarında kaybın 130 dB civarında olduğu gözlenmektedir. 6. kuşak için rezonans frekansı 90 Hz civarındadır. Minimum noktalar 160 Hz, 220 Hz ve 301 Hz civarındadır. 1000 Hz civarında kayıp 175 dB civarındadır. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere 4. kuşak ile 6. kuşağın transfer kaybı davranışlarının malzemeler yer değiştirilmeden önceki durum ile benzer olduğu, 5. kuşağın ise diğer kuşaklara göre farklı davranış sergilediği görülmektedir.

5.1.2.3 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve L = 81 mm Olan Panel

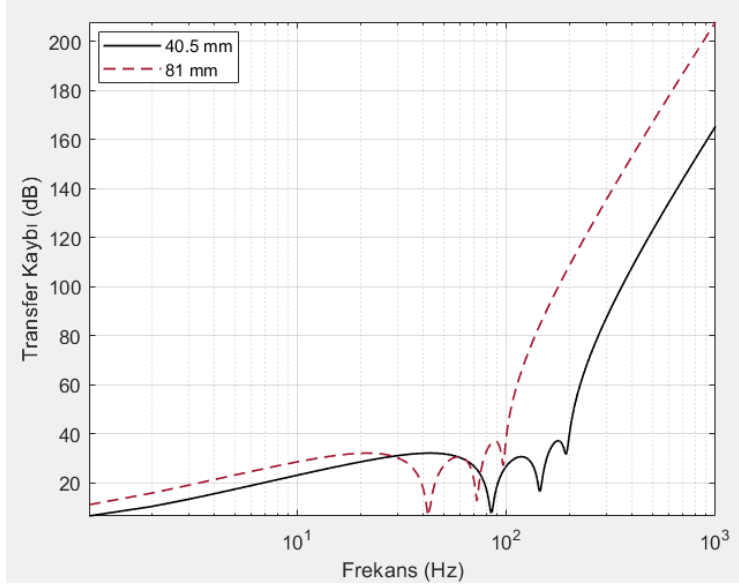
Bu bölümde Fibonacci serisinin dört, beş ve altıncı kuşaklarına göre dizilim yapılmış, her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.12 – 5.14'te gösterilen üç ayrı panel yapısı

tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.19 - 5.21’de normal geliş durumu için verilmiştir.



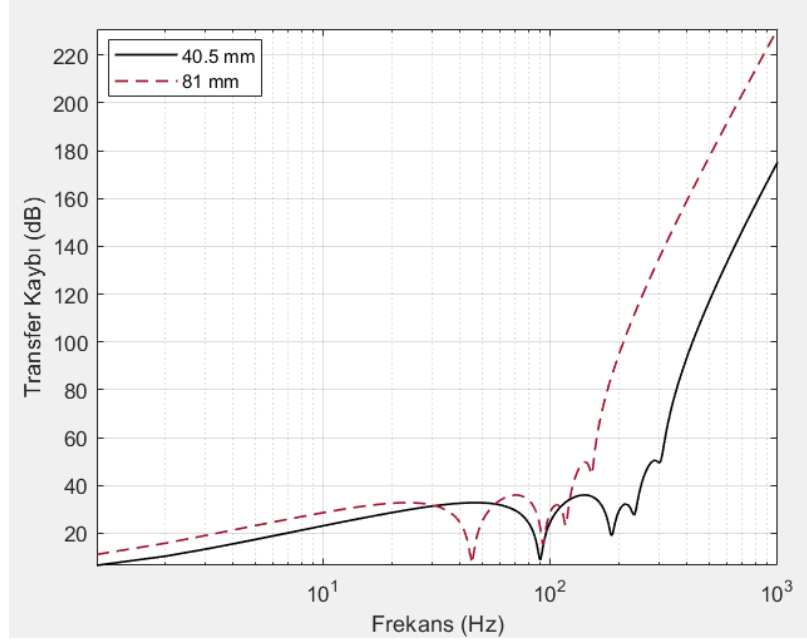
Şekil 5.19. Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı farkı.

Şekil 5.19’da 4. kuşak panelin iki farklı kalınlık değeri için transfer kaybı davranışı gösterilmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 87 Hz'den 36 Hz'e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 100 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 20 dB’dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı her iki kalınlık için yakındır.



Şekil 5.20. Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı farkı.

Şekil 5.20'de 5. kuşak panelin iki farklı kalınlık değeri için transfer kayıpları gösterilmektedir. $L = 40,5$ mm ve $L = 81$ mm durumlar için rezonans frekanslarının sırasıyla 84 Hz ve 42 Hz civarında olduğunu gösterilmektedir. Bu frekanslar civarında 5. kuşak panelin transfer kayıpları minimumdur. Kademe 2 panelinin toplam kalınlığının iki katına çıkması sonucu 300 Hz - 1000 Hz aralığında kayıp miktarının yaklaşık 55 dB arttığını görülmektedir. Toplam kalınlığın aynı olduğu 4. kuşak ile 5. kuşak paneli karşılaştırıldığında daha fazla katmana sahip 5. kuşak panelinin daha iyi kayıp özelliği gösterdiği görülmektedir. Ses frekansı, rezonans frekanslarının altında ise transfer kaybı 5 dB - 6 dB civarındadır.



Şekil 5.21. Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı farkı.

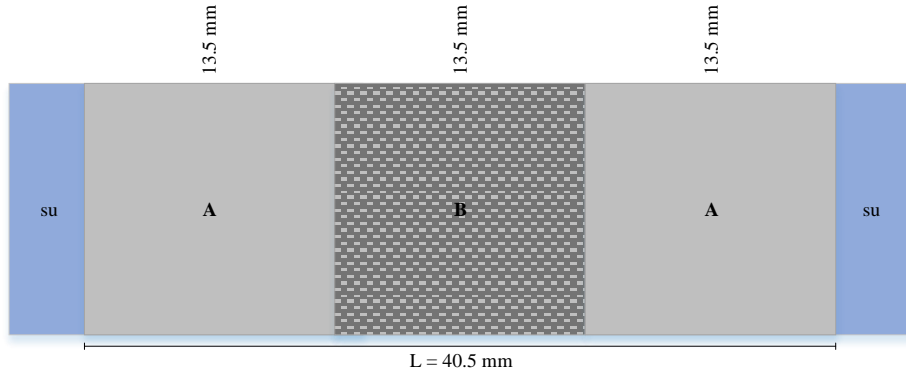
Şekil 5.21'de 6. kuşak panelin iki farklı kalınlık değeri için transfer kayıpları gösterilmektedir. $L = 81$ mm durumunda, transfer kaybı 45 Hz ve 93 Hz'de neredeyse sıfıra eşittir ve $L = 40.5$ mm durumda, transfer kaybı 90 Hz'de minimumdur. Transfer kaybı frekansla birlikte artmaktadır ve 303 Hz'den itibaren kayıp için sürekli artış gözlenmektedir. İnce ve kalın paneller için dB'deki kayıp farkı 56 dB civarındadır. Bu sonuçlar, 6. kuşak panelin özellikle kalın yapılar için daha önemli bir yalıtım performansı sergilediğini göstermektedir.

5.2 Su Ortamında Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımları

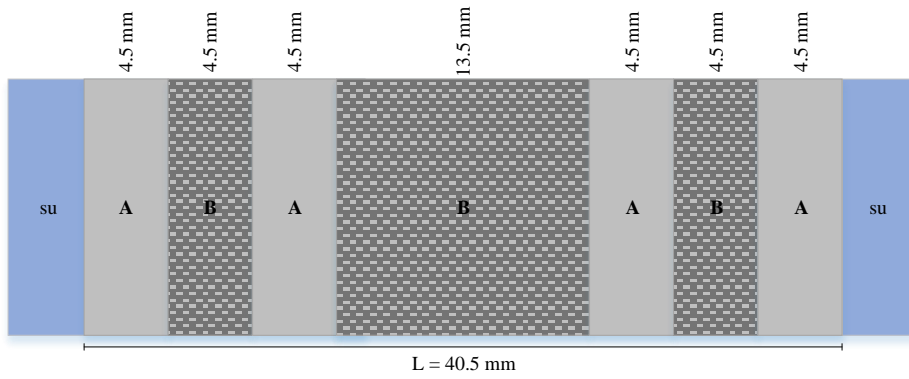
Bu bölümde tasarlanan Cantor ve Fibonacci dizilimli çok katmanlı paneller su ortamında incelenmiş ve performansları farklı yapısal parametreler için gösterilerek kıyaslanmıştır. Tasarımlarda hava ortamında olduğu gibi elastik ve gözenekli malzemeler kullanılmıştır.

5.2.1 Cantor Seri Dizilimli Su Ortamında Çok Katmanlı Panel Tasarımları

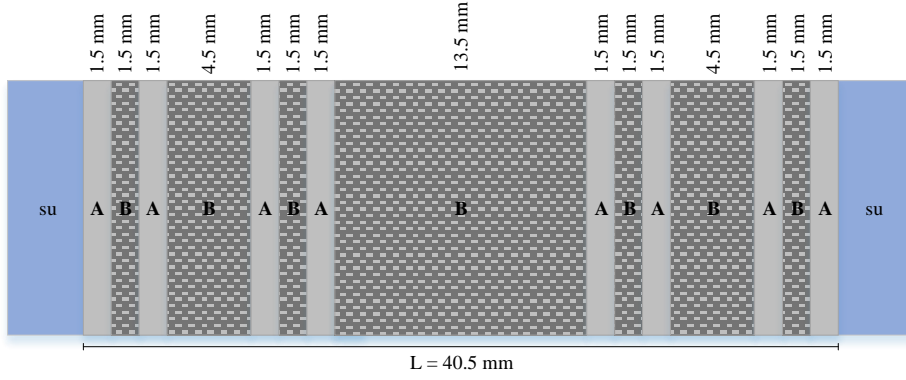
Bu bölümde su ortamında Cantor serisinin ilk üç kademesine göre tasarım yapılmış ve her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm alındığında oluşan yapılar sırasıyla Şekil 5.22 - 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.22. Su ortamında Cantor serisi kademe 1 dizilim yapısı.



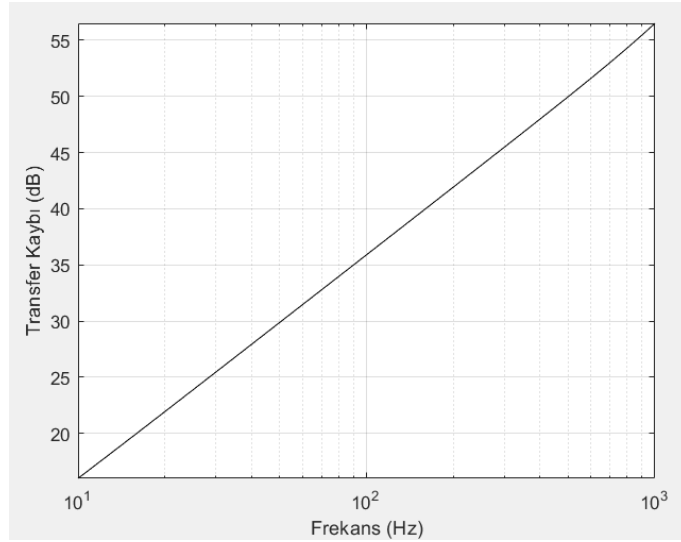
Şekil 5.23. Su ortamında Cantor serisi kademe 2 dizilim yapısı.



Şekil 5.24. Su ortamında Cantor serisi kademe 3 dizilim yapısı.

5.2.1.1 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve $L = 40.5$ mm Olan Panel

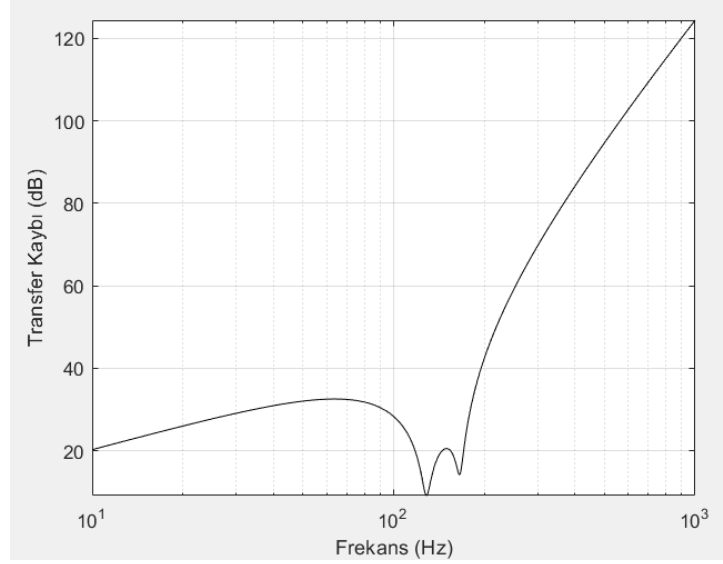
Bu bölümde Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilimi yapılmış, her bir katmanın toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.22 - 5.24'te verilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar su olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybına ait grafik sonuçları Şekil 5.25 - 5.27'de normal geliş durumu için verilmiştir.



Şekil 5.25. Su ortamında Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı.

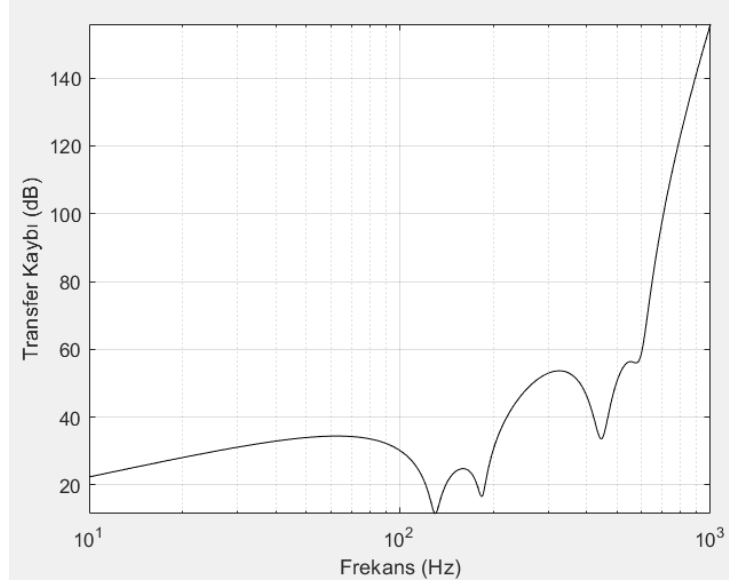
Şekil 5.25'te kademe 1 panelinin su ortamında toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değişimi gösterilmektedir. Panelde minimum noktaların kaybolduğu ve

transfer kaybı karakteristiğinin doğrusal olarak arttığı gözlenmektedir. Transfer kaybının hava ortamına göre 1000 Hz civarında yaklaşık 55 dB azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.26. Su ortamında Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı.

Şekil 5.26'da su ortamında kademe 2 panelinin rezonans frekans değeri 127 Hz civarındadır. 165 Hz civarında yeni minimum nokta oluşmaktadır. 165 Hz frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 124 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen kademe 2'de katman sayısı arttığı için kayıp artmaktadır. Transfer kaybının hava ortamına göre 1000 Hz'de 40 dB azaldığı görülmektedir.

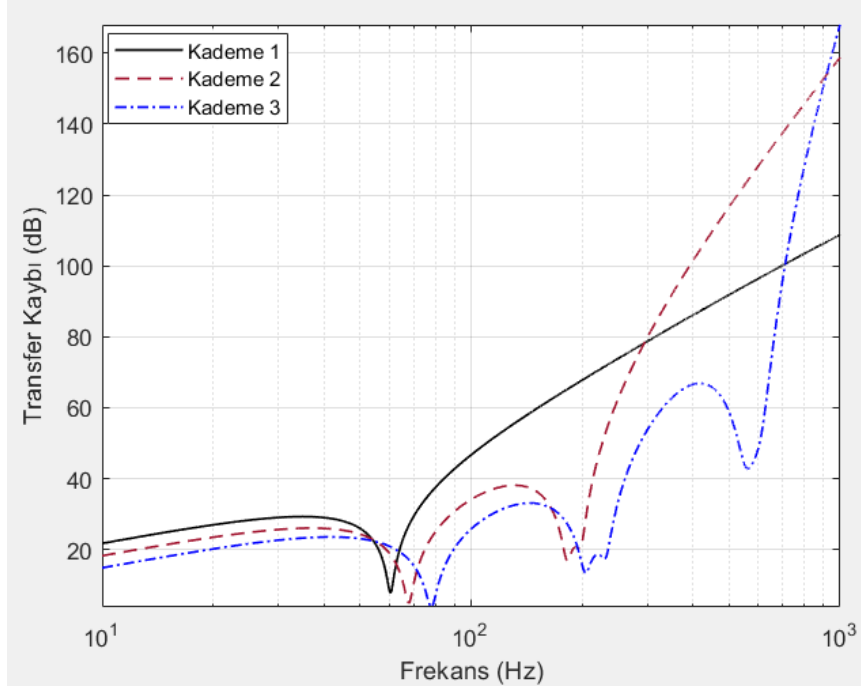


Şekil 5.27. Su ortamında Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı.

Şekil 5.27’de su ortamında kademe 3 panelinin rezonans frekans değeri 128 Hz civarındadır. 183 Hz ve 450 Hz civarında yeni minimum nokta oluşmaktadır. 584 Hz frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 155 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen kademe 3’te katman sayısı arttığı için kayıp artmaktadır. Transfer kaybının hava ortamına göre 1000 Hz’de 15 dB azaldığı görülmektedir.

5.2.1.2 Gözenekli (A) – Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel

Bu bölümde Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilimi yapılmış (önceki tasarımdan farklı olarak malzemeler yer değiştirilmiş), her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.22 - 5.24’te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar su olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.28’de normal geliş durumu için verilmiştir.

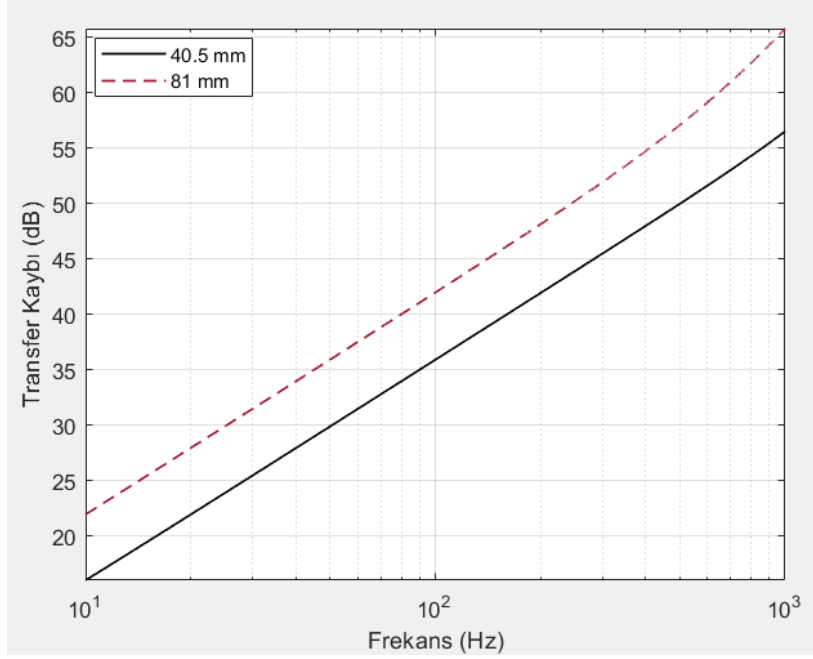


Şekil 5.28. Su ortamında Cantor serisi farklı kademelere göre transfer kaybı.

Şekil 5.28'de, $L = 40.5$ mm durum için su ortamında A ve B katman malzemeleri (A= gözenekli ve B= elastik malzeme) yer değiştirildiğinde, kademe 1- kademe 3 panellerinin transfer kayıplarının frekansla değişimleri gösterilmektedir. Kademe 1 için 60 Hz civarında rezonans frekansın olduğu ve 1000 Hz civarında malzemelerin yer değiştirilmediği durumla arasında 55 dB'lik bir kayıp artışı olduğu görülmektedir. Kademe 2 için rezonans frekansının malzemeler yer değiştirilmeden önceki duruma göre 127 Hz'den 67 Hz'e düştüğü, 1000 Hz civarında farkın 34 dB olduğu görülmektedir. Kademe 3 için ise rezonans frekansının 128 Hz'den 78 Hz'e düştüğü, 1000 Hz civarında ise aradaki kayıp artışının 10 dB civarında olduğu gözlenmektedir. Kademe 2 ve kademe 3 panelleri için, minimum nokta sayısı daha fazladır ve kademe 2 panelinin transfer kaybı özelliği kademe 3 paneline göre daha karardır. Grafikten, su ortamında malzemeleri yer değiştirmenin kaybı arttırdığı anlaşılmaktadır.

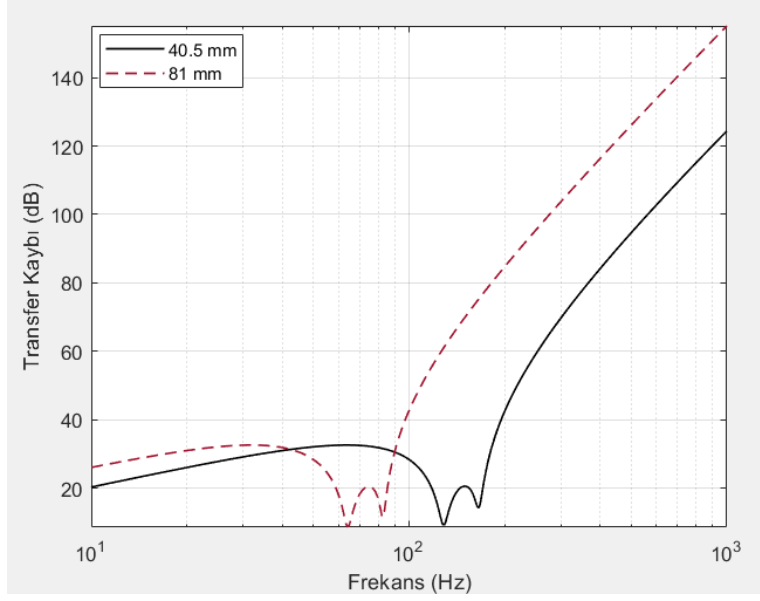
5.2.1.3 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve $L = 81$ mm Olan Panel

Bu bölümde Cantor serisinin ilk üç kademesine göre dizilimi yapılmış, her birinin toplam kalınlığı 81 mm (önceki tasarımların iki katı) olan ve Şekil 5.22 - 5.24'te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar su olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.29 - 5.31'de normal geliş durumu için verilmiştir.



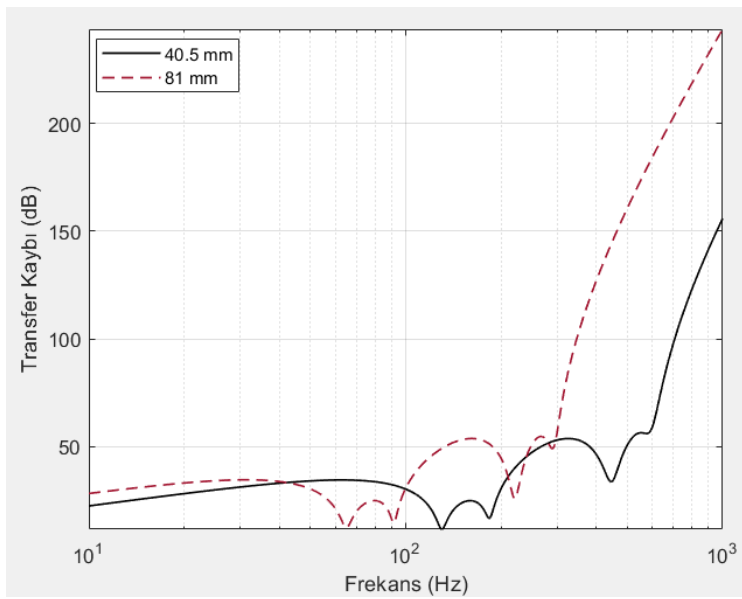
Şekil 5.29. Su ortamında Cantor serisi kademe 1 transfer kaybı farkı.

Şekil 5.29'da kademe 1 panelinin iki farklı kalınlık değeri için transfer kaybı davranışı gösterilmektedir. Kademe 1'de su ortamında her iki kalınlık değerinde de rezonans frekansının olmadığı gözlenmektedir. Kaybın doğrusal olarak arttığı ve aradaki farkın neredeyse sabit 6 dB olduğu görülmektedir.



Şekil 5.30. Su ortamında Cantor serisi kademe 2 transfer kaybı farkı.

Şekil 5.30'da su ortamında kademe 2 panelinin toplam kalınlığı iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 129 Hz'den 64 Hz'e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 165 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 32 dB'dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı 5 dB civarındadır.

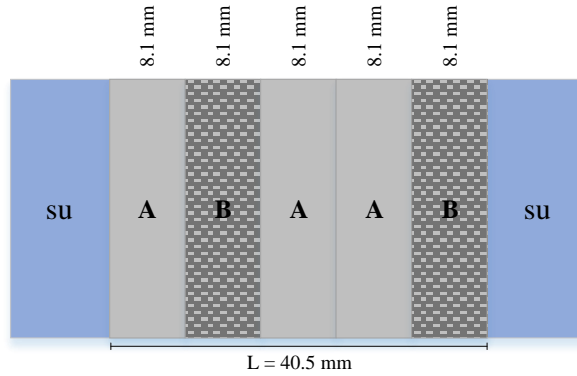


Şekil 5.31. Su ortamında Cantor serisi kademe 3 transfer kaybı farkı.

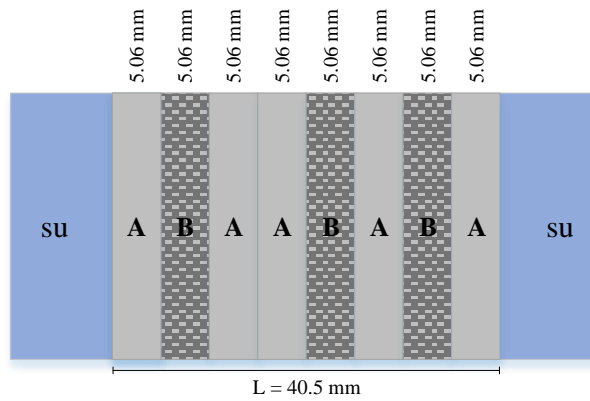
Şekil 5.31’de su ortamında kademe 3 panelinin toplam kalınlığı iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 128 Hz'den 64 Hz'e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 704 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 113 dB’dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı farkı 5 dB civarındadır.

5.2.1 Fibonacci Serisi Dizimli Su Ortamında Çok Katmanlı Panel Tasarımları

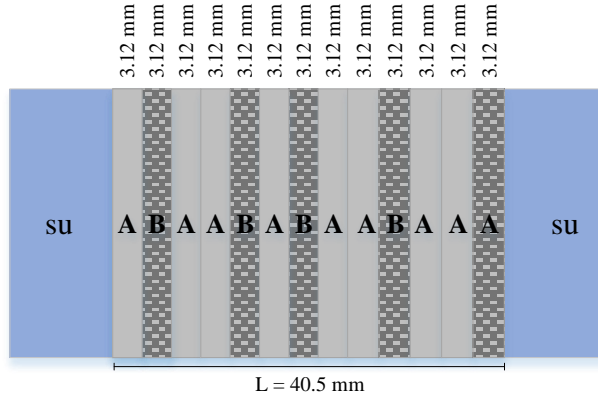
Bu bölümde su ortamında Fibonacci serisi denemelerinde kullanılacak olan dördüncü, beşinci ve altıncı kuşağa ait katman dizilim sırası Şekil 5.12 – 5.14’te verilmiştir.



Şekil 5.32. Su ortamında Fibonacci serisi 4. kuşak dizilim yapısı.



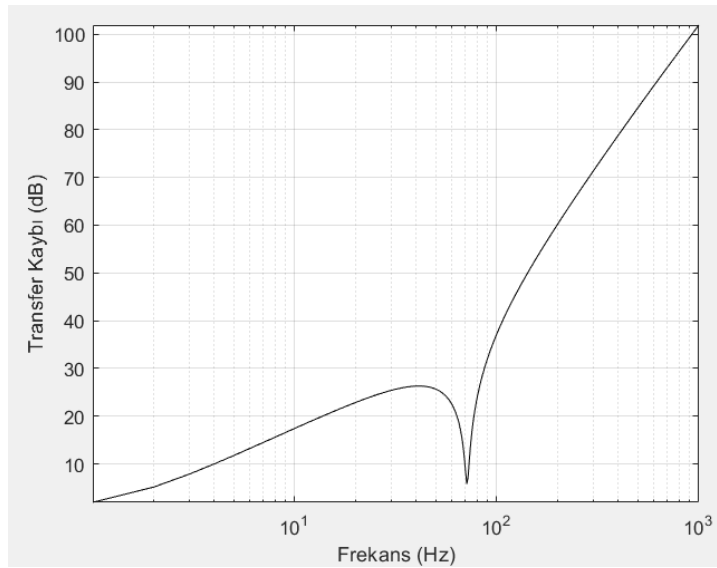
Şekil 5.33. Su ortamında Fibonacci serisi 5. kuşak dizilim yapısı.



Şekil 5.34. Su ortamında Fibonacci serisi 6. kuşak dizilim yapısı.

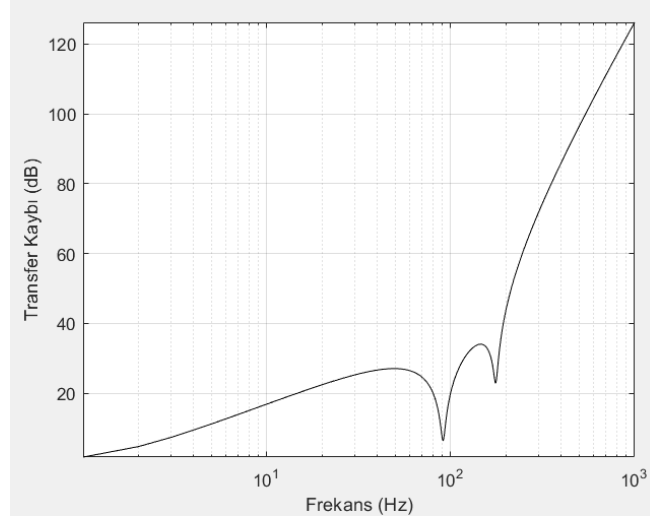
5.2.1.1 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve $L = 40.5$ mm Olan Panel

Bu bölümde Fibonacci serisinin dört, beş ve altıncı kuşaklarına göre dizilim yapılmış, her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.32 – 5.34’te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar su olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.35 - 5.37’de normal geliş durumu için verilmiştir.



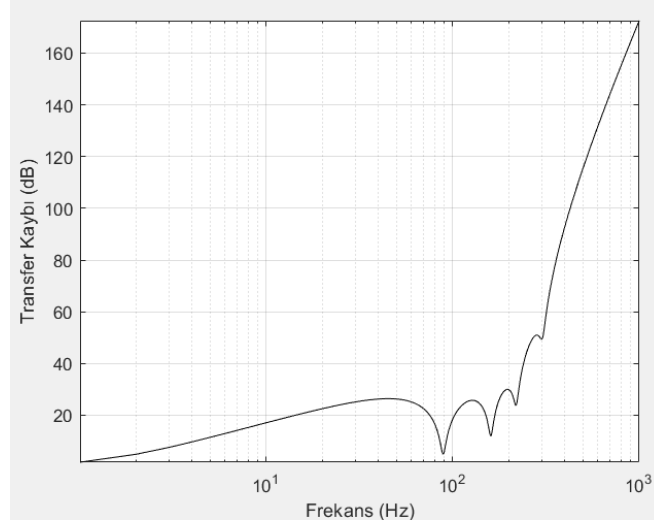
Şekil 5.35. Su ortamında Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı.

Şekil 5.35’de su ortamında 4. kuşak panelin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için transfer kaybının frekansla değışimi gösterilmektedir. Panelin rezonans frekans değeri 71 Hz civarındadır. Rezonans frekansından itibaren kaybın arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 101 dB civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.36. Su ortamında Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı.

Şekil 5.36’da su ortamında 5. kuşak panelin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için rezonans frekans değeri 91 Hz civarındadır. 176 Hz civarında yeni minimum nokta oluşmaktadır. 176 Hz’den itibaren kaybın tamamen arttığı 1000 Hz civarında 125 dB olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen 5. kuşak panelinde katman sayısı arttığı için kayıp artmaktadır.

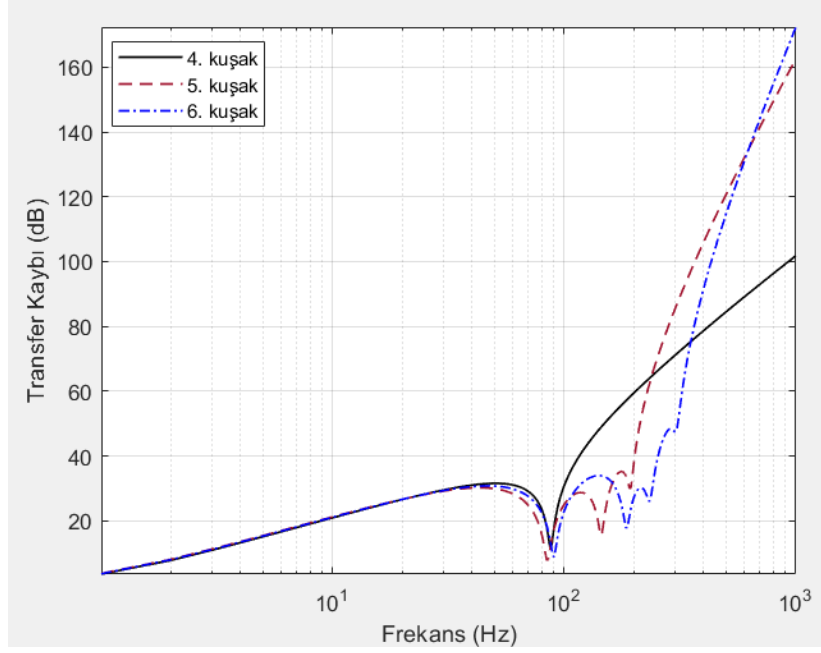


Şekil 5.37. Su ortamında Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı.

Şekil 5.37’de 6. kuşak panelin toplam 40.5 mm kalınlık değeri için rezonans frekans değeri 90 Hz civarındadır. 160 Hz ve 219 Hz civarlarında yeni minimum noktalar oluşmaktadır. 301 Hz frekansından itibaren kaybın tamamen arttığı, 1000 Hz civarında ise kaybın 172 dB civarında olduğu görülmektedir. Aynı kalınlık olmasına rağmen 6. kuşak panelin katman sayısı arttığı için kayıp artmıştır.

5.2.1.2 Gözenekli (A) – Elastik Malzeme (B) ve L = 40.5 mm Olan Panel

Bu bölümde Fibonacci serisinin dört, beş ve altıncı kuşaklarına göre dizilim yapılmış (önceki tasarımdan farklı olarak malzemeler yer değiştirilmiş), her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve 5.32 - 5.34’te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar su olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.38’de normal geliş durumu için verilmiştir.

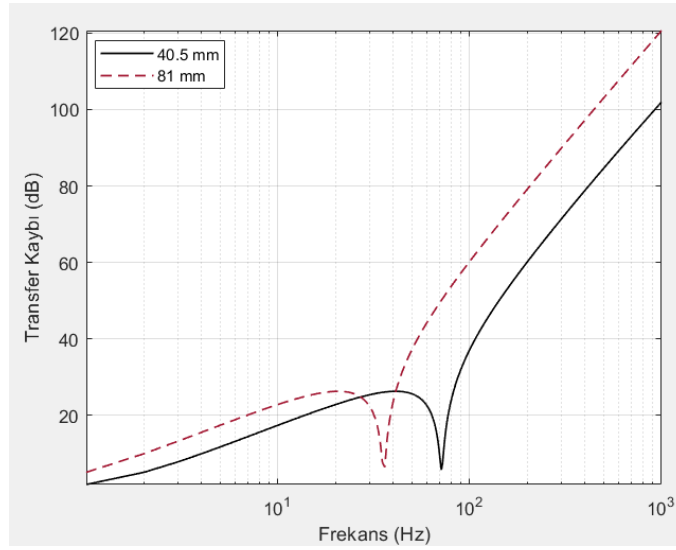


Şekil 5.38. Su ortamında Fibonacci serisi farklı kuşaklara göre transfer kaybı.

Şekil 5.38'de, $L = 40.5$ mm durum için A ve B katman malzemeleri yer değiştirildiğinde, 4. kuşak - 6. kuşak panellerinin transfer kayıplarının frekansla değişimleri gösterilmektedir. 4. kuşak için rezonans frekansının 71 Hz'den 87 Hz'e yükseldiği, kaybın ise 1000 Hz civarında 101 dB olduğu görülmektedir. 5. kuşak panelinde rezonans frekansının 91 Hz'den 84 Hz'e düştüğü, minimum noktaların arttığı ve 144 Hz ile 192 Hz civarında minimum nokta oluştuğu görülmektedir. 1000 Hz civarında kaybın 162 dB civarında olduğu gözlenmektedir. 6. kuşak için rezonans frekansı 90 Hz civarındadır. Minimum noktalar 185 Hz ve 234 Hz civarındadır. 1000 Hz civarında kayıp 172 dB civarındadır. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere 4. kuşak ile 6. kuşağın transfer kaybı davranışlarının malzemeler yer değiştirilmeden önceki durum ile benzer olduğu, 5. kuşağın ise diğer kuşaklara göre farklı davranış sergilediği görülmektedir.

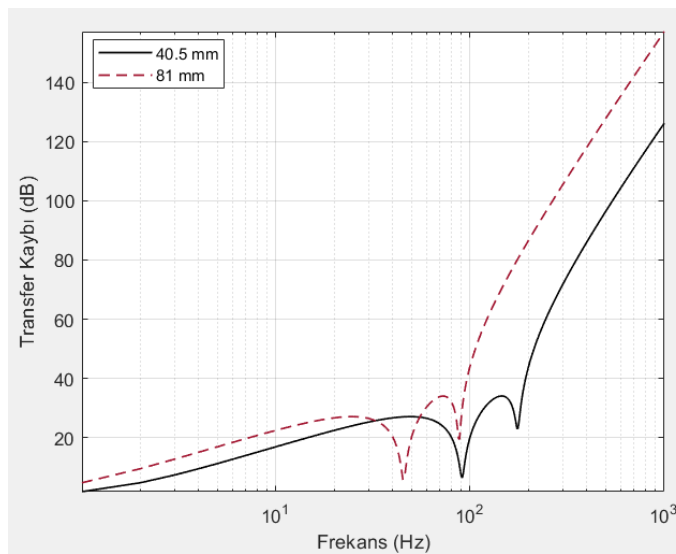
5.2.1.3 Elastik (A) – Gözenekli Malzeme (B) ve $L = 81$ mm Olan Panel

Bu bölümde Fibonacci serisinin dört, beş ve altıncı kuşaklarına göre dizilim yapılmış, her birinin toplam kalınlığı 40.5 mm olan ve Şekil 5.32 – 5.34'te gösterilen üç ayrı panel yapısı tartışılmıştır. İlk ve son katmanlar hava olarak alınmıştır. Elde edilen transfer kaybı sonuçları Şekil 5.39 - 5.41'de normal geliş durumu için verilmiştir.



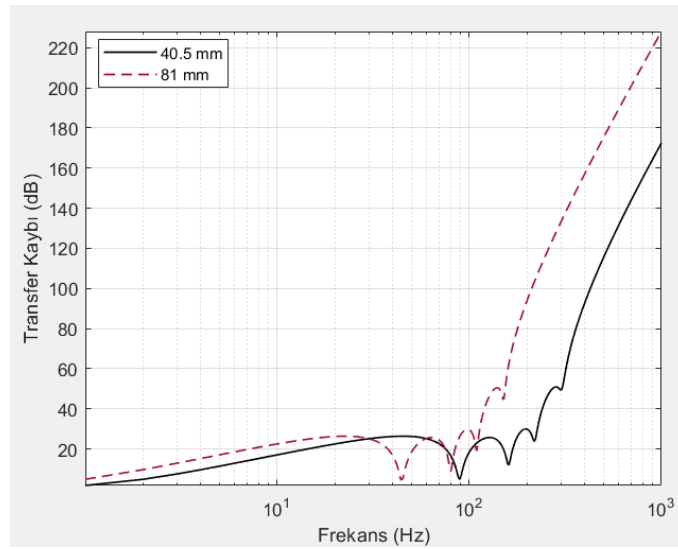
Şekil 5.39. Su ortamında Fibonacci serisi 4. kuşak transfer kaybı farkı.

Şekil 5.39’da su ortamında 4. kuşak panelin iki farklı kalınlık değeri için transfer kaybı davranışı gösterilmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 71 Hz’den 36 Hz’e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 100 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 33 dB’dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı farkı 6 dB civarındadır.



Şekil 5.40. Su ortamında Fibonacci serisi 5. kuşak transfer kaybı farkı.

Şekil 5.40'ta su ortamında 5. kuşak panelin iki farklı kalınlık değeri için transfer kaybı davranışı gösterilmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 91 Hz'den 45 Hz'e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 200 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 40 dB'dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı farkı 6 dB civarındadır.



Şekil 5.41. Su ortamında Fibonacci serisi 6. kuşak transfer kaybı farkı.

Şekil 5.41'de su ortamında 6. kuşak panelin iki farklı kalınlık değeri için transfer kaybı davranışı gösterilmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıkarıldığında rezonans frekansı 90 Hz'den 44 Hz'e düşmektedir ve rezonans frekansları civarında transfer kaybının sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Toplam kalınlık iki katına çıktığında 360 Hz - 1000 Hz aralığında frekansla birlikte kayıp miktarı da artmaktadır ve bu değer yaklaşık 68 dB'dir. Rezonans frekans değerlerinden daha düşük frekanslar için transfer kaybı farkı 6 dB civarındadır.

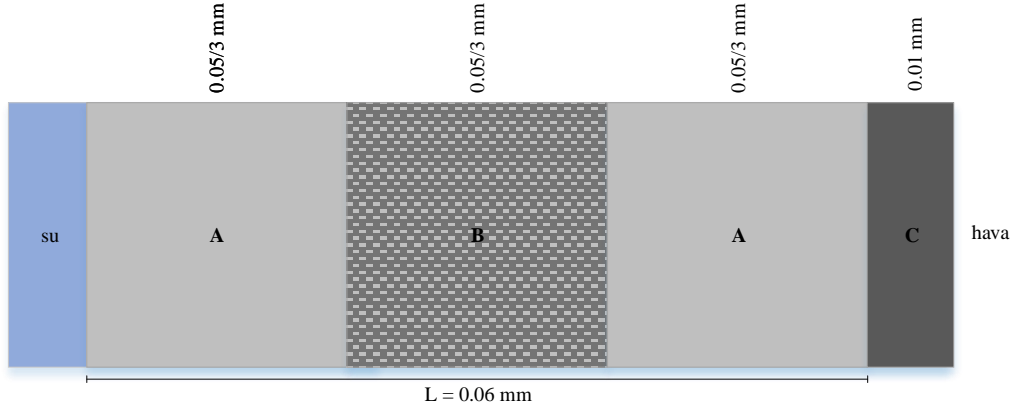
5.3 Sualtı Uygulamalarında Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımları

Bu bölümde sualtı uygulamalarından denizaltıda basıncı karşılayan ve dıştaki yapı olan mukavim tekne üzerine Cantor ve Fibonacci dizilimli kaplamalar uygulanarak transfer kaybı sonuçları incelenmiştir. Tasarımlarda kullanılan malzemelerin bilgisi Tablo 5.3'te verilmiştir. Mukavim tekneyi modellemek üzere güncel uygulamalarda kullanılan HY80 malzemesi seçilmiştir [39].

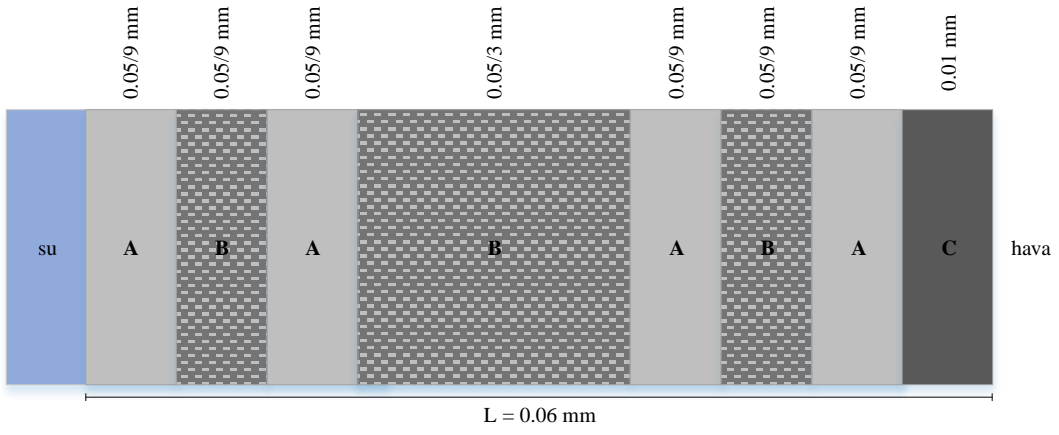
Tablo 5.3. Sualtı uygulamaları akustik panel tasarımında kullanılan malzemelerin temel özellikleri

A: Elastik Malzeme		C: HY80	B: Gözenekli Malzeme	
Yoğunluk	7700 kg/m ³	7746 kg/m ³	Yoğunluk	100 kg/m ³
Young Modülü	2.16e11 N/m ²	207 GPa	Hava Akış Direnci	30000 rayls/m
Poisson Oranı	0.27	0.3	Gözeneklilik	0.95
			Bükümlülük	1.1
			Viskozite Boyutu	3.7 x 10 ⁻⁵ m
			Termal Boyutu	1.96 x 10 ⁻⁴ m

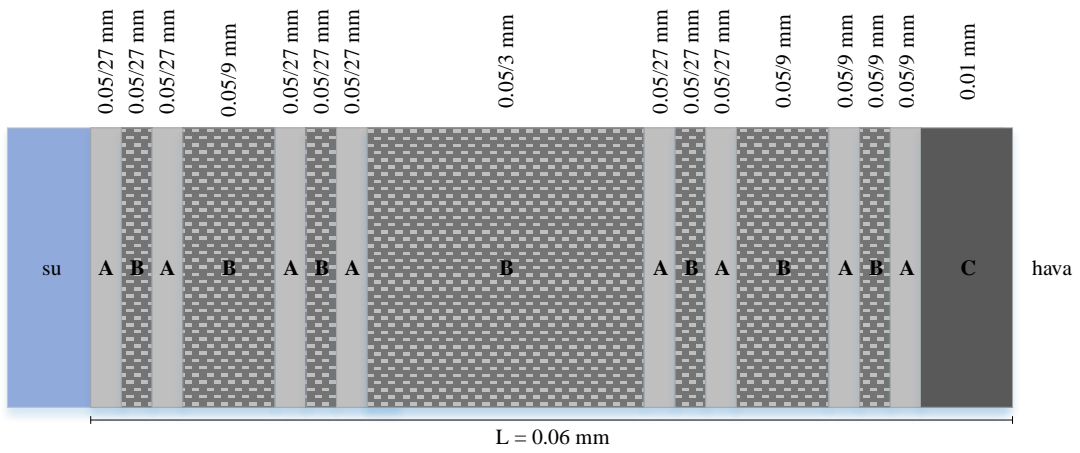
Çalışmada ilk olarak HY80 çeliği üzerine, Cantor serisi ilk üç kademe dizilimli paneller Şekil 5.42 - 5.44'teki gibi kaplama olarak uygulanmıştır. Elde edilen transfer kaybına ait sonuçlar Şekil 5.45'te normal geliş durumu için verilmiştir.



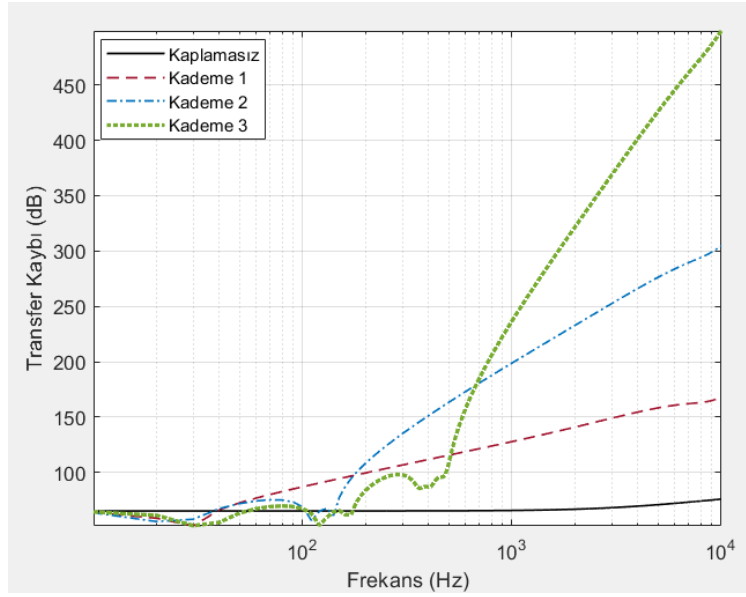
Şekil 5.42. Cantor serisi kademe 1 ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.



Şekil 5.43. Cantor serisi kademe 2 ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.



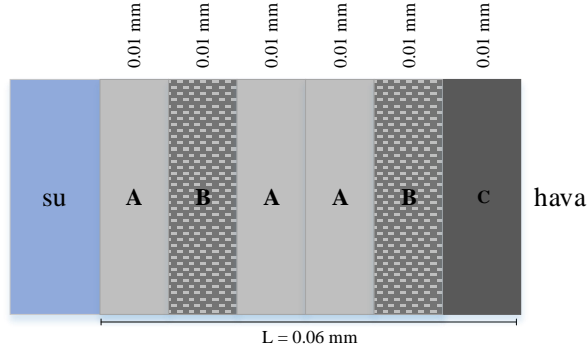
Şekil 5.44. Cantor serisi kademe 3 ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.



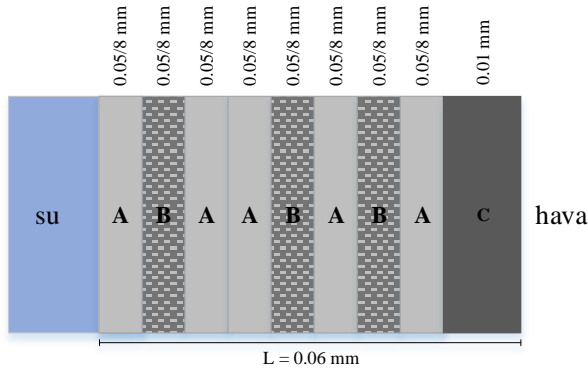
Şekil 5.45. Cantor serisi ile yapılan kaplamaya ait transfer kaybı.

Şekil 5.45'te verilen sonuçlara göre kaplama olmadığı durumda kayıp 65 dB -75 dB civarındadır. Cantor serisi kullanılarak yapılan kaplamada ise kaybın 480 Hz'den itibaren arttığı görülmektedir. 480 Hz'den düşük frekanslarda ise kademe 3 ile yapılan kaplamada kayıp miktarının kaplamasız durumdan daha düşük olduğu gözlenmektedir. Kademe 1 ile yapılan kaplamada kayıp 10 kHz'de 167 dB iken, kademe 2'de 304 dB, kademe 3'te ise 498 dB civarındadır.

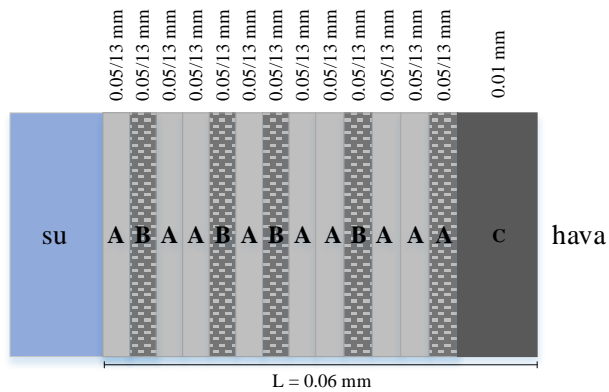
Çalışmanın bu kısmında ise HY80 çeliği, Fibonacci serisine ait dört, beş ve altıncı kuşak dizilimli panellerle kaplanarak tasarlanan yapılar Şekil 5.46 - 5.48'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.49'da normal geliş durumu için verilmiştir.



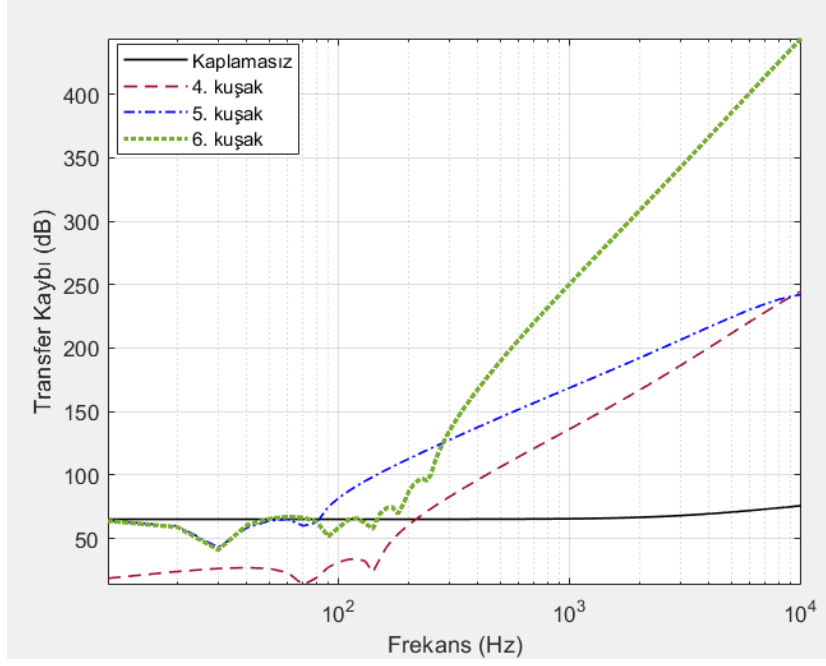
Şekil 5.46. Fibonacci serisi 4. kuşak ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.



Şekil 5.47. Fibonacci serisi 5. kuşak ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.



Şekil 5.48. Fibonacci serisi 6. kuşak ile oluşturulan ve çelik katman üzerine uygulanan kaplama yapısı.



Şekil 5.49. Fibonacci serisi ile yapılan kaplamaya ait transfer kaybı.

Şekil 5.49'da elde edilen sonuçlara göre kaplama olmadığı durumda kayıp 65 dB -75 dB civarındadır. Cantor serisi kullanılarak yapılan kaplamada ise kaybın 250 Hz'den itibaren arttığı görülmektedir. 250 Hz'den düşük frekanslarda ise kademe 3 ile yapılan kaplamada kayıp miktarının kaplamasız durumdan daha düşük olduğu gözlenmektedir. 4. kuşak ve 5. kuşak ile yapılan kaplamada kayıp 10 kHz'de 245 dB iken, 6. kuşak ile yapılan kaplamada 443 dB civarındadır.

Bu bölümde elde edilen sonuçlara göre denizaltı yüzeyine kaplama uygulanması durumunda özellikle yüksek frekanslarda sesin iletim ve yansımaya özelliklerinin oldukça etkileneceği anlaşılmaktadır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu tez çalışması ile Cantor ve Fibonacci seri dizilimine sahip çok katmanlı paneller tasarlanmış ve tasarlanan panellerin akustik performansları incelenmiştir. Cantor serisinin çok katmanlı panellerde denenmesi literatür için yenidir. Cantor ve Fibonacci serileri ile tasarlanan çok katmanlı yapılar ilk olarak hava ortamında, daha sonra su ortamda incelenmiş, elde edilen sonuçlar ulusal/uluslararası kongrelerde sunulmuştur [40-42].

Cantor serisinin ilk üç kademesine göre yapılan tasarımlarda kademe sayısı arttıkça transfer kaybının arttığı ve panelin daha iyi yalıtım sağladığı gösterilmiştir. Benzer durum sualtı uygulamaları için de geçerlidir.

Fibonacci serileri için de Cantor serilerinde belirtilen koşullara göre hava ve su ortamında tasarlanan çok katmanlı panellerin transfer kaybı sonuçları incelenmiştir. Hava ortamında Fibonacci serisi dört, beş ve altıncı kuşak dizilimleri için elde edilen sonuçlar, Cantor serilerine göre katman sayısı arttığı için kaybın da arttığını göstermektedir. Toplam kalınlık iki katına çıkarıldığında panellerin rezonans frekansının azaldığı, kaybın ise arttığı görülmüştür. Malzemeler yer değiştirildiğinde dördüncü ve altıncı kuşağın benzer kayıp davranışları sergilediği, beşinci kuşak için ise kaybın düştüğü gözlenmiştir.

Su ortamında Fibonacci dizilimli tasarımlar incelendiğinde dört ve altıncı kuşağın hava ortamıyla benzer kayıp davranışları sergilediği, beşinci kuşak için ise transfer kaybının azaldığı görülmüştür. Toplam katman kalınlığı iki katına çıkarılarak sonuçlar hava ortamı ile karşılaştırıldığında dört ve altıncı kuşağın yine aynı şekilde benzer davranışlar sergilediği, beşinci kuşakta ise kaybın azaldığı görülmüştür. Katman malzemeleri yer değiştirildiğinde ise dört ve beşinci kuşağın benzer davranış sergilediği fakat beşinci kuşakta kaybın arttığı gözlenmiştir.

Çalışmada ayrıca denizaltı uygulamalarını modellemek üzere güncel bir malzeme olan HY80 çeliği üzerine Cantor ve Fibonacci dizilimli paneller kaplama olarak uygulanmıştır. Cantor tipi kaplamalarda yüksek frekanslarda en çok kayıp, kademe 3 dizilimi ile elde edilirken, düşük frekanslarda en iyi performans, kademe 1 dizilimi ile elde edilmiştir. Fibonacci tipi kaplamalarda ise yüksek frekanslarda en iyi performans 6. kuşak dizilimi ile elde edilirken, düşük frekanslarda 5. kuşak dizilimi ile en iyi performansın elde edildiği anlaşılmaktadır. Bütün frekans bandı düşünüldüğünde ise 5. kuşak diziliminin en iyi performansı sağladığı söylenebilir.

Özet olarak bu tez çalışmasında tasarlanan çok katmanlı paneller güncel birçok ses yalıtım uygulamalarında oldukça iyi yalıtım sağlamak üzere kullanılabilir. İzleyen çalışmalarda ise yeni malzeme ve dizilimler kullanılarak farklı tasarımların yapılabileceği düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] L.L. Beranek, Acoustical Properties of Homogeneous, Isotropic Rigid Tiles and Flexible Blankets, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 19, (1947) 556-568.
- [2] C. Zwikker and C.W. Kosten, Sound Absorbing Materials, Elsevier, New York, 1947.
- [3] M.A. Biot, Theory of propagation of Elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 28, (1956) 168–178.
- [4] E.F. Stacy, Sound Insulation in Buildings, Journal (Royal Society of Health), Vol. 79, (1959) 789-797.
- [5] M.E. Delany and E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Applied Acoustics, Vol. 3, (1970) 105–116.
- [6] W.T. Thomson, Transmission of Elastic Waves Through a Stratified Solid Medium, Journal of Applied Physics, Vol. 21, (1950) 89-93.
- [7] D.L. Folds and C.D. Loggins, Transmission and Reflection of Ultrasonic Waves in Layered Media, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 62, (1977) 1102-1109.
- [8] W. Lauriks, P. Mees and J.F. Allard, The Acoustic Transmission Through Layered Systems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 155, (1992) 125–132.
- [9] B. Brouard, D. Lafarge and J.F. Allard, A general method of modelling sound propagation in layered media, Journal of Sound and Vibration, Vol. 183, (1995) 129–142.

- [10] J.S. Bolton, N.M. Shiau, Y.J. Kang, Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials, Vol. 191, **(1996)** 317-347.
- [11] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens and J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, Wiley, **1999**.
- [12] Y.J. Kang and I.H. Jung, Sound propagation in circular ducts lined with noise control foams, Journal of Sound and Vibration, Vol. 239, **(2001)** 255–273.
- [13] C.M. Lee and Y. Xu, A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials, Journal of Sound and Vibration, 326(1-2), **(2009)** 290–301.
- [14] D. Rhazi, D and N. Atalla, A Simple Method to Account for Size Effects in the Transfer Matrix Method, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 127, **2010**.
- [15] Y. Liu, Sound Transmission Through Triple-panel Structures Lined with Poroelastic Materials, Journal of Sound and Vibration, Vol. 339, **(2015)** 376–395.
- [16] C.L. Darner, (1954). An Anechoic Tank for Underwater Sound Measurements Under High Hydrostatic Pressures, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 26, **(1954)** 148–148.
- [17] E. Meyer, W. Schilz and K. Tamm, Construction of an Anechoic Underwater Sound Measuring Tank, Navy Underwater Sound Laboratory New London, **1965**.
- [18] F.A. Barge, Underwater acoustic absorption characteristics of composites of wood, rubber and steel, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 64, **(1978)** 1732–1732.

[19] T. Ramotowski and K. Jenne, NUWC XP-1 Polyurethane-Urea: A New, "Acoustically Transparent" Encapsulant for Underwater Transducers and Hydrophones, *Oceans*, 227-230, **2003**.

[20] L. Roux, C. Audoly, C.hristian Granger, A.C. Hladky and N. Kessissoglou, An Analytical Study of a Periodic Multilayered Medium for Underwater Applications, *Acoustics 2017*, 19-22 November 2017, Perth, Australia, (**2017**) 9.

[21] J. Dong and P. Tian, Review of underwater sound absorption materials, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 508, (**2020**) 10.

[22] C. H. Hansen, Fundamentals of acoustics, *American Journal of Physics*, Vol. 19, **1951**.

[23] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Harvard University Press, **1972**.

[24] J. P. Arenas and M. Crocker, Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, *Sound & Vibration*, Vol. 44, (**2010**) 12-17.

[25] Anonim, Sound Absorbing Materials, https://en.wikipedia.org/wiki/Fiberboard#/media/File:Fibreboard_07877.jpg Sound-Absorbing Materials (Erişim tarihi: **04 Ocak 2022**).

[26] Anonim, Kauçuk Halı, <https://www.basotectsunger.com.tr/kaucuk-hali/> (Erişim tarihi: **04 Ocak 2022**).

[27] Anonim, Sunta Panel <https://www.arkopa.com.tr/urunler/18-mm-sunta-panel/> (Erişim tarihi: **04 Ocak 2022**).

- [28] Z. Hou, F. Wu and Y. Liu, Acoustic wave propagating in one-dimensional Fibonacci binary composite systems, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 344, (2004) 391–397.
- [29] A. Wareing, Acoustical Modeling of Rooms with Extended-Reaction Surfaces, Master of Applied Science, The University of British Columbia, Canada, 2000.
- [30] Anonim, Transverse and longitudinal waves in a spring, <https://www.sciencephoto.com/media/1157051/view/transverse-and-longitudinal-waves-in-a-spring-illustration> (Erişim tarihi: 04 Ocak 2022).
- [31] K. Tageman, Modelling of sound transmission through multilayered elements using the transfer matrix method, Master Thesis, Chalmers Teknik Üniversitesi, İsveç, 2013.
- [32] A. London, A. W. Orlacchio, R. L. Bach and D. Epstein, Propagation of Sound through Solids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 24, (1952) 453.
- [33] S. L. Garrett, *Understanding Acoustics*, Graduate Texts in Physics, 2020.
- [34] M. A. Biot, Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Filled Saturated Porous Solid, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 28, (1956) 168-191.
- [35] Z. Fellah, M. Fellah, C. Depollier, E. Ogam, Wave Propagation in Porous Materials, *Computational and Experimental Studies of Acoustic Waves*, (2018) 99-119.
- [36] J. F. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media*, Second Edition, A John Wiley and Sons Ltd. Publication, 2009.
- [37] Y. Hu, Développement de panneaux hybrides passifs/actifs pour l’acoustique, Doktora Tezi, École centrale de Lyon, Fransa, 2011.

[38] G. Dağ, Çok Katmanlı Yapılarda Ses Dalgası Yayılımın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2017**.

[39] Anonim, HY80, <https://en.wikipedia.org/wiki/HY-80> (Erişim tarihi: **14 Ocak 2022**).

[40] İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Fibonacci Serileri ile Ses Emici Yüzey Tasarımı, İlk Bildiriler Konferansı - İBK, Ankara, **2021**.

[41] İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Cantor Dizilimli Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımı, 10. URSI-2021 Kongresi, Ankara, **2021**.

[42] İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Cantor Fraktal Dizilimli Alçıpan-Hava Akustik Yüzey Tasarımı, Engineers of Future International Student Symposium - EFİS 2021, Zonguldak, **2021**.

EKLER

EK 4 - Tezden Türetilmiş Yayınlar

- İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Multilayered Acoustic Panel Design According to Cantor Series, Turk J Elec Eng & Comp Sci, 2022. (Gönderimde)

EK 5 - Tezden Türetilmiş Bildiriler

- İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Fibonacci Serileri ile Ses Emici Yüzey Tasarımı, İlk Bildiriler Konferansı - İBK, Temmuz 2021, Ankara.
- İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Cantor Fraktal Dizilimli Alçıpan-Hava Akustik Yüzey Tasarımı, Engineers of Future International Student Symposium - EFİS 2021, Temmuz 2021, Zonguldak.
- İ. Kaya ve Ç. S. Gürel, Cantor Dizilimli Çok Katmanlı Akustik Panel Tasarımı, 10. URSI-2021 Kongresi, Eylül 2021, Ankara.