



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİMER TABANLI AKUSTİK METAMATERİYELLER BAZLI GÜRÜLTÜ
KESİCİ VE AZALTICI SİSTEMLERİN TASARIM, ARAŞTIRMA VE
KARAKTERİZASYONLARI**

NEVZAT DOĞAN YİĞİT

FİZİK ANABİLİM DALI

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİMER TABANLI AKUSTİK METAMATERİYELLER BAZLI GÜRÜLTÜ
KESİCİ VE AZALTICI SİSTEMLERİN TASARIM, ARAŞTIRMA VE
KARAKTERİZASYONLARI**

NEVZAT DOĞAN YİĞİT

**FİZİK ANABİLİM DALI
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selami PALAZ**

**Şanlıurfa
2025**

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, karşılaştığım tüm zorlukların çözümünde her türlü desteği sağlayan danışmanım Sayın Doç. Dr. Selami PALAZ'a;

Tez çalışmam sırasında fikirleriyle ufkumu açan, desteğini ve yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Zafer ÖZER'e ve tez sürecinde COMSOL Multiphysics programı ile gerçekleştirdiğim analizlerde teknik destek sağlayan Prof. Dr. Emirullah MEHMETOV'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübelerini benimle paylaşan, yönlendirmeleri ve manevi destekleriyle yanımda olan Dr. Öğr. Üyesi Nuri YORULMAZ'a ,ayrıca çalışmamın deneysel aşamalarına katkı sağlayan Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTAM) müdürüne, çalışanlarına ve Dr. Eyüp YAŞAR'a da teşekkür ederim. Bu süreçte her zaman yanımda olan, sabır ve anlayışla desteklerini esirgemeyen aileme, dostlarıma ve tüm sevdiklerime minnettarlığımı ifade eder; katkı sunan herkese gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Fononik Kristallerin Tarihi	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
3. GEREÇ VE YÖNTEM	10
3.1. Teori	10
3.2. Fononik Kristal ve Ters Örgü	11
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	11
3.4. Nümerik (Sayısal) Yöntem	12
3.4.1. Bant yapısının hesaplanması	13
3.4.2. İletim kaybının hesaplanması	17
3.5. Modelleme ve Meshleme Detayları	17
3.6. Test Sinyalinin Üretilmesi	18
3.7. DeneySEL Kurulum ve Ölçüm Süreci	18
3.8. Sinyal İşleme ve Frekans Analizi	23
3.9. Grafiklerin Oluşturulması ve Kayıt	24
4. BULGULAR	25
4.1. Similasyon ve DeneySEL Sonuçları	25
5. TARTIŞMA	65
5.1. Örgü Tipine Bağlı Performans Değişimi	65
5.2. Boyut Parametrelerinin Etkisi	66
5.3. Sıvı Dolgunun Etkisi	66
5.4. Uygulama Açısından Değerlendirme	67
6. SONUÇLAR	68
6.1. Örgü Türü ve Geometrik Parametrelerin Etkileri	68
6.2. Simülasyon-DeneySEL Uyum ve Sapma Nedenleri	68
6.3. Uygulama Önerileri ve Bilimsel Çıkarımlar	68
6.4. Sonuç ve Gelecek Perspektifi	69
7. ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	75
EKLER	76

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİMER TABANLI AKUSTİK METAMATERYELLER BAZLI GÜRÜLTÜ KESİCİ VE AZALTICI SİSTEMLERİN TASARIM, ARAŞTIRMA VE KARAKTERİZASYONLARI

NEVZAT DOĞAN YİĞİT

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Tez Danışman: Doç. Dr. Selami PALAZ

Yıl: 2025, Sayfa : 76

Bu çalışma, çevresel ve endüstriyel gürültü problemlerine çözüm getirmek amacıyla, polimer tabanlı akustik metamateryallere dayalı fononik kristal yapıların tasarımını, analizini ve karakterizasyonunu kapsamaktadır. Özellikle demiryolu taşımacılığı gibi yüksek ses kaynaklarının etkilerini azaltacak düşük maliyetli ve etkili ses yalıtım sistemlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında, literatür taraması ile fononik kristallerin dalga yayılımı üzerindeki etkileri ve ses yalıtım uygulamalarındaki potansiyeli detaylı biçimde incelenmiştir. Uygulama aşamasında, iki boyutlu periyodik yapılar içeren fononik kristallerin farklı örgü tipleri (kare, dikdörtgen, üçgen, bal peteği) kullanılarak çok katmanlı tasarımları yapılmıştır. Bu yapılarda, örgü sabiti ve silindirik çubuk yarıçapı gibi geometrik parametrelerin iletim kaybına etkileri hem COMSOL Multiphysics yazılımı ile yapılan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonlarıyla hem de deneysel ölçümlerle analiz edilmiştir. Ayrıca, çubukların içinin boş veya sıvı dolu olması gibi parametrelerin bant yapısı ve akustik performansa etkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, örgü tipi, geometrik boyutlar ve iç dolgu türünün ses yalıtım performansı üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışma, teorik analizlerin ötesine geçerek deneysel doğrulamalarla desteklenmiş ve fononik kristallerin ses yalıtımı uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, fononik kristal tabanlı bu sistemlerin akustik gürültü azaltımında yenilikçi ve uygulanabilir çözümler sunduğu değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Fononik kristal, Akustik metamateryal, Polimer yapılar, Ses yalıtımı, Sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

MASTER THESIS

DESIGN, RESEARCH AND CHARACTERIZATION OF NOISE CANCELING AND ATTENUATING SYSTEMS BASED ON POLYMER BASED ACOUSTIC METAMATERIALS

NEVZAT DOĞAN YİĞİT

**HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
DEPARTMENT OF PHYSICS**

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selami PALAZ

Year: 2025, Page : 76

This study focuses on the design, analysis, and characterization of phononic crystal structures based on polymer acoustic metamaterials to provide solutions for environmental and industrial noise problems. It particularly aims to develop low-cost and effective noise insulation systems for high-noise sources such as railway transportation. A comprehensive literature review was conducted to explore the wave propagation behavior of phononic crystals and their potential in sound insulation applications. In the practical phase, two-dimensional periodic phononic structures with different lattice types (square, rectangular, triangular, honeycomb) were designed and modeled. The effects of geometric parameters such as lattice constant and cylinder radius on transmission loss were analyzed using Finite Element Method (FEM) simulations conducted in COMSOL Multiphysics, and validated through experimental measurements. The study also examined the impact of parameters such as hollow or liquid-filled cylinders on the band structure and acoustic performance. The results show that the lattice type, geometric dimensions, and core filling material play a significant role in acoustic insulation performance. This research goes beyond theoretical analysis by incorporating experimental validation, demonstrating the applicability of phononic crystal systems in real-world noise control. The findings underline the potential of such structures as innovative and effective solutions for acoustic insulation.

KEYWORDS: Phononic crystal, Acoustic metamaterial, Polymer structures, Sound insulation, Finite element method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Birim hücreler, a) kare örgü, b) üçgen örgü, c) bal peteği örgü, d) dikdörtgen örgü.	14
Şekil 3.2. Farklı örgü türlerine sahip iki boyutlu fononik kristaller ve bunlara karşılık gelen birinci Brillouin bölgeleri: (a) Kare örgü. (b) Dikdörtgen örgü. (c) Düzenli üçgen örgü. (d) Altıgen örgü. (e) Kare örgü için birinci Brillouin bölgesi. (f) Dikdörtgen örgü için birinci Brillouin bölgesinin birinci çeyreği. (g) Düzenli üçgen ve altıgen örgüler için birinci Brillouin bölgesi.	16
Şekil 3.3. Üçgen örgü için iletim kaybının hesaplanmasında kullanılan sonlu yapı ve sınır koşulları.	17
Şekil 3.4. Last Voice PH 1000 model harici ses kartı.	20
Şekil 3.5. Deney düzeneği.	20
Şekil 3.6. Kare örgü deney düzeneği.	21
Şekil 3.7. Dikdörtgen örgü deney düzeneği.	21
Şekil 3.8. Üçgen örgü deney düzeneği.	22
Şekil 3.9. Bal peteği örgü deney düzeneği.	22
Şekil 3.10. Kullanılan polimer silindirik boruların şematik gösterimi.	23
Şekil 3.11. Deney düzeneği simülasyonu.	24
Şekil 4.1. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	25
Şekil 4.2. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	26
Şekil 4.3. Örgü sabiti $a_2=60$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	27
Şekil 4.4. Örgü sabiti $a_2=60$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	28
Şekil 4.5. Örgü sabiti $a_3=75$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	29
Şekil 4.6. Örgü sabiti $a_3=75$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	30
Şekil 4.7. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	31
Şekil 4.8. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	32
Şekil 4.9. Örgü sabiti $a_2=60$ mm $b_2=120$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	33
Şekil 4.10. Örgü sabiti $a_2=60$ mm $b_2=120$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	34
Şekil 4.11. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	35
Şekil 4.12. Örgü sabiti $a=75$ mm $b=150$ mm ve yarıçapı $r=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	36
Şekil 4.13. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	37
Şekil 4.14. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	38
Şekil 4.15. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	39
Şekil 4.16. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	40
Şekil 4.17. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	41
Şekil 4.18. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	42

Şekil 4.19. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	43
Şekil 4.20. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	44
Şekil 4.21. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	45
Şekil 4.22. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	46
Şekil 4.23. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.	47
Şekil 4.24. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	48
Şekil 4.25. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	49
Şekil 4.26. Örgü sabiti $a_2 = 60$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	50
Şekil 4.27. Örgü sabiti $a_3 = 75$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	52
Şekil 4.28. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm $b_1 = 100$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	53
Şekil 4.29. Örgü sabiti $a_2 = 60$ mm $b_2 = 120$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	54
Şekil 4.30. Örgü sabiti $a_3 = 75$ mm $b_3 = 150$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	55
Şekil 4.31. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	56
Şekil 4.32. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	58
Şekil 4.33. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	59
Şekil 4.34. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	60
Şekil 4.35. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	61
Şekil 4.36. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Temel örgü vektörleri.	15
Çizelge 3.2. Kullanılan polimer silindir malzemelerin yarıçapı, et kalınlığı ve örgü parametreleri.	23
Çizelge 4.1. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.	26
Çizelge 4.2. Örgü sabiti $a_2=60$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.	27
Çizelge 4.3. Örgü sabiti $a_3=75$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.	29
Çizelge 4.4. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	31
Çizelge 4.5. Örgü sabiti $a_2=60$ mm $b_2=120$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	33
Çizelge 4.6. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	35
Çizelge 4.7. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	37
Çizelge 4.8. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	39
Çizelge 4.9. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	41
Çizelge 4.10. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.	43
Çizelge 4.11. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.	45
Çizelge 4.12. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.	47
Çizelge 4.13. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.	49
Çizelge 4.14. Örgü sabiti $a_2=60$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.	50
Çizelge 4.15. Örgü sabiti $a_3=75$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.	51
Çizelge 4.16. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	53
Çizelge 4.17. Örgü sabiti $a_2=60$ mm $b_2=120$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	54
Çizelge 4.18. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	55
Çizelge 4.19. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	56
Çizelge 4.20. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	57
Çizelge 4.21. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.	59
Çizelge 4.22. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.	60
Çizelge 4.23. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.	61
Çizelge 4.24. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.	62

SİMGELER

%	Yüzde
a	Örgü Sabiti(mm)
f	Frekans
f_c	Merkez Açısal Frekans
r	Silindirik çubuğun yarıçapı
Δf	Bant Genişliği
Δf/f_c (%)	Normalize bant genişliği
λ	Dalga Boyu

KISALTMALAR

1D	Tek Boyutlu
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
BgPF	Background Pressure Field (Arka Plan Basınç Alanı)
CAD	Bilgisayar destekli tasarım (Fononik kristal geometrilerinin dijital ortamda çizilmesidir).
dB	Desibel
FDTD	sonlu fark zaman alanı
FFT	Fast Fourier Transform
FKr	Fononik Kristaller
LR	Yerel Rezonans
MDF	Medium Density Fiberboard
PML	Perfectly Matched Layer (Mükemmel Uyumlu Katman)
PWE	Düzlem Dalga Genişleme
TL	İletim kaybı

1. GİRİŞ

Fononik kristaller (FKr), farklı mekanik özelliklere sahip olan iki esnek malzemenin periyodik olarak düzenlenmiş yapılarını temsil eder ve bu yapılar, akustik ve elastik dalgaların yayılımını engelleyebilme yeteneğine sahip yeni tip materyallerdir. FKr'lerin ayırt edici özelliği, belirli frekans boşluklarında, yani fononik bant aralıkları olarak bilinen bölgelerde, akustik dalgaların ilerleyememesi durumudur. Bu durum, fotonik kristallerdeki elektronların belirli frekanslarda hareket etmelerinin yasaklanmasıyla benzerlik gösterir. Fononik kristallerdeki bu yasaklanmış frekans boşlukları, ses, titreşim ve ısı iletimine dair dalga formundaki enerjilerin kontrolünü sağlayarak, özellikle akustik mühendislik alanında geniş uygulama alanları sunmaktadır (Deymier, 2013).

Fononik kristallerin, ses yalıtımı, negatif kırılma ve alt dalga boyu görüntüleme gibi önemli uygulamalardaki potansiyeli, bu yapıları mühendislik ve teknoloji alanlarında son derece değerli hale getirmektedir. Son çalışmalar, rezonans malzemeleri kullanılarak geniş fononik bant aralıkları elde edilebileceğini ve havadaki ses dalga boyunun altındaki frekanslarda akustik dalgaları kontrol etme yeteneğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Kushwaha, M. S., & Halevi, P. (1996). Bu metamateryaller, özellikle akustik dalgaların iletilmesinin engellendiği fononik bant aralıkları sayesinde mükemmel yansıma ve yalıtım özellikleri sergileyerek, tıbbi ultrason görüntüleme, akustik dalga kılavuzları, savunma sanayi uygulamaları ve sismik dalga önleme gibi farklı alanlarda kullanılabilmektedir (Sukhovich vd., 2009 , Zhao vd., 2010).

Fononik kristallerin yapısal tasarımı, kullanılan örgü yapısına, malzeme parametrelerine ve geometrik düzenine bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Bu yapılar, akustik dalgaların yayılmasını etkileyen bir dizi parametreyi içerir; çubukların yoğunluğu, elastik modülleri, şekilleri ve diziliş düzenleri, fononik bant aralıklarının genişliğini ve şeklini belirleyen başlıca faktörlerdir. Ayrıca, örgü türleri (örneğin kare, üçgen veya petek örgü) ve malzeme seçimleri, fononik kristalin frekans yanıtını ve bant yapısını doğrudan etkileyebilir. Bu yapılar üzerinde yapılan dispersiyon analizi, bazı frekans boşluklarında tam bant aralıkları, diğerlerinde ise yalnızca belirli yönlerde yasaklanan ilerlemeler gösteren kısmi bant aralıklarının varlığını ortaya koymaktadır (Liu vd., 2000). Bu çalışma, farklı geometrik düzenlemeler ve örgü yapıları kullanarak fononik kristallerin bant yapıları üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Özellikle, daha önce kare örgü yapılarıyla elde edilen fononik bant aralıklarının, dikdörtgen örgü, üçgen örgü ve petek örgü yapılarındaki alternatif düzenlemelerle nasıl değiştiği araştırılacaktır.

Bu yaklaşım, fononik kristallerin akustik ve elastik özelliklerinin daha derinlemesine anlaşılmasını sağlayarak, yapıların performansını geliştirmek amacıyla tasarım kriterlerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Fononik kristaller, özellikle mühendislik ve akustik alanlarında geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta olup, son yıllarda bu yapıların teorik ve deneysel analizlerine olan ilgi artmıştır. Bu çalışma, fononik kristallerin bant yapılarının incelenmesi yoluyla bu alandaki mevcut bilgi birikimine katkıda bulunmayı ve farklı örgü yapılarının performanslarını karşılaştırarak tasarım süreçlerine yeni bakış açıları getirmeyi amaçlamaktadır.

1.1. Fononik Kristallerin Tarihi

Fononik kristaller, farklı elastik özelliklere sahip malzemelerin periyodik olarak birleştirilmesiyle oluşan ve dalga kontrolü sağlayan yapay yapılardır. Bu kristaller, tek (1D), iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) konfigürasyonlarda sentezlenebilir. Malzemeler arasındaki elastik özellik farklılıkları ve periyodik düzen, Bragg saçılımı veya rezonans etkileşimleri sonucunda akustik ve elastik dalgalar için bant aralıkları oluşturabilmektedir. Fononik kristaller ve akustik kompozitler üzerindeki araştırmalar, fotonik kristaller ve metamalzemeler alanındaki gelişmelerle paralellik göstermiş ve bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

Periyodik kompozit yapılar fikri, ilk olarak Yablonovitch (1987) tarafından dielektrik özellikleri farklı malzemelerin birleştirilmesiyle önerilmiştir. Yablonovitch, üç boyutlu bir kompozit yapı içinde belirli frekans aralıklarında dalga yayılımının engellenebileceğini teorik olarak kanıtlamıştır. Bu keşif, bu tür yapılar için frekans spektrumlarında yasaklı frekansların, yani bant aralıklarının varlığı gerekliliğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, fotonik kristal teknolojilerinin gelişimine katkı sağlamış ve bu alanda yeni uygulama alanlarının keşfedilmesine olanak tanımıştır. Fotonik kristallerle ilgili çalışmaların devamında, araştırmacıların dikkati fononik kristallere yönelmiş ve bu yapıların mekanik dalga kontrolündeki potansiyeli araştırılmaya başlanmıştır. Fononik kristallerin karakterizasyonu, ses ve elastik dalgaların yayılım mekanizmalarına dayandığı için, bu çalışmaların temelinde akustik ve elastik süreklilik mekaniği yatmaktadır. İncelenen dalga modlarına bağlı olarak terminolojide de farklılaşma görülmektedir. Özellikle, sadece boyuna dalgaların baskın olduğu durumlarda "sonik kristal" ifadesi kullanılırken, çok modlu dalga yayılımının söz konusu olduğu karmaşık yapılar "fononik kristal" olarak adlandırılmaktadır.

Periyodik malzemeler, genellikle doğada bulunmayan ve eşsiz özellikler sergileyen, insan tarafından tasarlanmış kompozit materyallerdir. Bu tür malzemeler, akustik (Li & Chan, 2004), elektromanyetik (Smith vd., 2004), termal (Maksimović & Jakšić, 2005), plazmonik (Garcia-Vidal vd., 2005) dalgalar gibi potansiyel olarak ilgi uyandıran hemen hemen her türlü ortam dalgasını veya yüzey dalgasını işlemek amacıyla tasarlanabilmektedir. Periyodik yapı, bir birim hücrenin bir, iki ya da üç boyutta sınırsız veya sınırlı tekrarıyla oluşturulur. 1987 yılında, fotonik kristallerin, gerçek kristallerdeki elektronların yayılmasına benzer şekilde, kırılma indisi değiştirilmiş periyodik yapılarda optik dalgaların yayılmasıyla ilgili bir çalışma önerilmiştir (Yablonovitch, 1987). Bu durum, Fransız fizikçi Brillouin'in katılarda yaptığı araştırmalarla benzerlik göstermektedir. Periyodik ortamlarda elastik dalgaları, elektrik devrelerindeki elektromanyetik dalgaları ve kristallerdeki elektronları bir sistem olarak değerlendirmiştir. Bu sayede Brillouin bölgesi, bant aralığı gibi önemli kavramlar, farklı dalga biçimlerine dayalı olarak ortaya çıkmıştır. Bu değişik dalga biçimlerine, skaler dalgalar olarak elektronları, vektör dalgalar olarak optik dalgaları, basınç dalgaları olarak akustik dalgalar ve tensör dalgalar olarak elastik dalgaları örnek verilebilir. 1990'ların başlarında Sigalas ve Economou (1993), elastik bir kristalin durum yoğunluğu ve bant yapısındaki frekans aralıklarının varlığını kanıtlamışlardır. Kısa bir süre sonra, iki boyutlu periyodik elastik bir kompozit malzemede enine polarizasyon titreşimleri için ilk tam bant yapısı hesaplanmıştır (Kushwaha vd., 1993). Ardından, 1995 yılında, bir fononik kristaldeki tam bant aralıklarının oluşumu ve bant genişliğinin, kristal yapıyı oluşturan malzemelerdeki ses hızları, elastik sabitler ve yoğunluk kontrastına bağlı olduğu gösterilmiştir (Kafesaki vd., 1995).

2001 yılında, Vassuer vd., iki boyutlu, katı/katı fononik kristallerde yayılan elastik dalgalar için tam bant aralığını deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, fononik kristaller üzerine çalışan bilim insanları için bir temel oluşturarak elastik fononik kristallerin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Sigalas (1998), akustik ve elastik dalgaların fononik kristallerde uygun kusurlar oluşturularak yönlendirilebileceğini göstermiştir. Bu davranış, birçok ilginç fiziksel özellik ve potansiyel uygulama için fırsatlar yaratmıştır. Elastik ve akustik bant aralıklarının varlığı, kompozit ortamlardaki titreşimler ve dalga lokalizasyonunu daha iyi anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu anlayış, elastik/akustik filtreler, gürültü kontrolü, yüksek hassasiyetli mekanik sistemler için titreşimsiz ortamların tasarımı gibi çok sayıda mühendislik uygulamasının gerçekleştirilmesini mümkün kılabilir.

Fononik bant aralığı oluşturan malzemelerin üstün özellikleri, oluşturdıkları

bant yapılarından kaynaklandığından dolayı, kristal yapının mümkün olan en geniş bant aralığına sahip şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Elastik ve akustik bant yapılarını incelemek için, düzlem dalga genişleme (PWE) yöntemi (Goffaux & Vigneron, 2001), sonlu fark zaman alanı (FDTD) yöntemi (Tanaka & Tamura, 1998; Sun & Wu, 2007), çoklu saçılma teorisi (MST) (Psarobas vd., 2000; Leroy vd., 2009) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) (Goffaux & Sanchez-Dehesa, 2003; Lee vd., 2019) gibi çeşitli teorik yöntemler kullanılmıştır.

Akustik bir fononik kristal, elastik saçıcı elemanların, elastik bir ana malzeme üzerinde periyodik bir düzenle yerleştirildiği kompozit yapılar olup, bu tür malzemeler tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) olarak tasarlanabilir. Bu tasarımlar, akustik ve elastik dalgaların yayılma özelliklerini değiştirebilme potansiyeline sahiptir. Tek boyutlu fononik kristaller, farklı elastik malzemelerin katmanlı dizilimlerinden veya değişen katmanların oluşturduğu yapılarla şekillenir. İki boyutlu kristaller ise, elastik bir çubuğa benzer bir malzemenin, farklı sıvı veya katı bir ana ortamda periyodik olarak yerleştirilmesinden oluşur. Üç boyutlu fononik yapılar, basit kübik, gövde merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik gibi örgü yapıları ile farklı geometrilere sahip elastik saçıcı elemanlarının, farklı bir matris malzeme boyunca düzenli aralıklarla dağılmasıyla meydana gelir.

Periyodik olarak yerleştirilmiş elastik saçıcılar arasındaki aralık, kristal boyunca yayılan akustik ve elastik dalgaların dalga boyu ile karşılaştırılabilir olduğunda Bragg koşulu sağlanır. Bragg koşulunun sağlanması, fononik kristaldeki enerji dağılımının değiştirilmesine olanak tanır. Bu bağlamda, kristallerin frekans yayılma özellikleri, örgü parametrelerinin metre ile santimetre arasındaki ölçekteki değişimlere bağlı olarak, Hz'den kHz aralığına kadar önemli ölçüde etkilenir. Daha küçük örgü aralıklarında, örneğin milimetre ile mikrometre arasındaki ölçekte, kHz ile MHz arasındaki frekanslardaki dalgaların yayılma özellikleri de etkilenmektedir.

Akustik ve elastik bant aralıklarının oluşumuna etki eden temel mekanizmalar iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar; Bragg saçılması ve yerel rezonans (LR) dır. Yerel rezonans nedeniyle, bant aralığı oluşumu, frekans bölgesinde normal Bragg bantlarının yaklaşık 1/100'ü kadar daha düşük frekanslarda gerçekleşebilir (Li & Chan, 2004; Liu vd., 2000).

Fononik kristallerin üretiminde ana hedef, akustik ve elastik dalgaların herhangi bir yönde yayılmasını engelleyen geniş tam bant aralıkları oluşturmaktır. İki

boyutlu yapılar için büyük bant aralıklarının elde edilmesine yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Fononik kristallerde geniş bant aralıklarının elde edilmesi, sistem parametrelerinin stratejik manipülasyonu ile mümkün olmaktadır. Literatürde bu amaçla üç temel yaklaşım öne çıkmaktadır; malzeme özelliklerinin optimizasyonu, geometrik konfigürasyon modifikasyonları ve örgü topolojisi mühendisliğidir. Malzeme seviyesinde, yoğunluk ve elastik sabitlerde kontrollü değişimler yapılarak akustik empedans uyumsuzlukları artırılabilirken, doldurma oranlarının (filling fraction) ayarlanması ve sisteme üçüncü/dördüncü bileşenlerin eklenmesi gibi yöntemler etkili sonuçlar vermektedir (Mousanezhad vd., 2015; Song vd., 2016).

Geometrik modifikasyonlar kapsamında ise, simetri kırıcı tasarımlar (anizotropik çubuklar, açısal oryantasyon modülasyonları) ve kristal yapının döndürülmesi gibi teknikler Brillouin bölgesi sınırlarındaki mod dağılımlarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Kushwaha & Halevi, 1996; Khelif vd., 2010). Özellikle kare, dikdörtgen, üçgen ve bal peteği örgüleri gibi farklı Bravais örgü konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi, bant yapısı mühendisliği için önemli veriler sağlamaktadır (Mousanezhad vd., 2015; Song vd., 2016). Deneysel çalışmalar, düşük simetriye sahip yapıların ve anizotropik malzeme kombinasyonlarının, izotropik sistemlere kıyasla daha geniş bant aralıkları oluşturma konusunda üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır (Hu vd., 2021; Mir vd., 2023). Son yıllarda, fraktal ve yarı fraktal geometriye sahip yapıların dinamik özelliklerindeki ilginçlik, bu tür fononik kristallerin incelenmesine ve araştırılmasına olan ilgiyi artırmıştır (Mousanezhad vd., 2015; Song vd., 2016).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Norris vd., (2008), periyodik fraktal yapıda bulunan çubuksu saçıcılardan oluşan sistemlerin, iki boyutlu fononik kristallerdeki akustik bant aralığındaki frekans tepkisi üzerindeki etkilerini numerik olarak incelemek için sonlu fark zaman alanı (FDTD) analiz yöntemini kullanmışlardır. Kare örgü yapısında, katı bir ortamda yer alan katı çubuklar ile sıvı çubuklardan oluşan bir sistemde artan fraktal sıra iterasyonu veya fraktal boyut değişimleriyle fononik yapının davranışlarını araştırmışlardır. İncelenen katı ortamda, sıvı çubuklardan oluşan fraktal yapı, katı çubuklardan oluşan fraktal yapıya kıyasla daha uzun dalga boyları için etkili bir şekilde bant aralıkları oluşturma yeteneği sergilemiştir.

Ibanez vd., (2010), hava ortamında fraktal düzenlenmiş katı saçıcılar üzerindeki akustik dalga yayılımını araştırmıştır. Araştırmacılar, periyodik yapıli kompakt bir cihaz geliştirmek amacıyla Sierpinski fraktal geometrisinden yararlanmışlardır. Çalışmada, sonik kristallerin bant aralıklarının doluluk oranıyla ilişkisi temel alınarak, fraktal dağılımdaki saçıcı yarıçaplarını genetik algoritma ile optimize etmişlerdir. Bu yaklaşım, geniş bir zayıflama bandı elde etmek ve periyodik yapıların bant aralıklarını örtüştürmek amacıyla kullanılmıştır. Aynı araştırma grubu (Ibanez vd., 2012), fraktal temelli silindirik saçıcı dizilimlerinin akustik bariyer uygulamalarındaki performansını detaylı şekilde incelemiştir. Geliştirilen fraktal geometrili yapı, Bragg saçılmasını en üst düzeye çıkarmıştır. Çalışmada, rezonans ve soğurma mekanizmalarını birleştiren çoklu saçıcı sistemleri tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sonuçta ortaya çıkan akustik bariyer, gürültü kontrolü alanında etkili bir çözüm sunmuştur.

Kuo ve Piazza (2010), Alüminyum Nitrür (AlN) tabanlı fononik kristal dalga kılavuzlarında akustik dalga odaklanmasını deneysel olarak incelemiştir. 630 MHz merkez frekanslı konik mercek kullanarak, 560-680 MHz aralığında geniş bir durdurma bandı gözlemlememişlerdir. Bunun yerine, örgü sabitiyle uyumlu bir geçiş yolu oluşturarak, dalga kılavuzunda 630 MHz civarında merkezlenmiş bir geçiş bandı tespit etmişlerdir. Liu ve Fan (2013), T-kare fraktal yapıya sahip iki boyutlu fononik kristal modelini incelemiştir. Bragg saçılması ve yerel rezonansa dayalı fraktal fononik kristaller üzerine kapsamlı bir analiz yaparak, aynı doldurma oranına sahip fraktal ve fraktal olmayan fononik kristallerin bant yapılarındaki farklılıkları sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, bu iki yapının bant yapılarında belirgin farklar olduğunu göstermiştir. Çalışmalarının bulguları, fraktal tasarımın iki boyutlu fononik kristallerin bant yapıları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Yan vd., (2013), fraktal süper örgülerle

yapılandırılmış katmanlı fononik kristallerde, düzlem içi zaman-harmonik elastik dalgaların lokalizasyon durumlarını araştırmışlardır. Dalga lokalizasyonunu tanımlamak için, lokalizasyon faktörü uygulamış ve bu durumu transfer matrisi yöntemiyle hesaplamışlardır. Üç farklı fraktal süper örgü tasarımı üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarda, fraktal serilerinin artışıyla birlikte lokalizasyon faktörünün değeri belirgin şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Mousanezhad vd., (2015), iki boyutlu fononik kristallerde dalga yayılımının, yapısal hiyerarşi ve deformasyonla ilişkili etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarına göre, sıkıştırma altında olan yapının topolojik hiyerarşik yapısı ve kararsızlığın neden olduğu desen dönüşümleri, fononik kristallerin bant aralıkları ve yönlülüklerini düzenlemek için etkili bir yöntem olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Song vd., (2016), düşük kayıp ve yüksek kırılma indeksi özelliklerine sahip akustik meta malzemeleri araştırmak için alternatif bir yöntem önermişlerdir. Bu düşünceden yola çıkan araştırmacılar, fraktal geometri özelliğine sahip yeni bir akustik meta malzeme tasarımı geliştirmişler ve üretimini yapmışlardır. Tasarımlarını, doğadaki coğrafik yapıların fraktal karakteristiklerinden ilham alarak şekillendirmişlerdir. Bu yaklaşımı uygulayarak, düz bir akustik mercek tasarlamış ve deneysel ölçümler sonucunda 2 kHz ile 5 kHz frekans aralıklarında mükemmel odaklama özellikleri elde ettiklerini ortaya koymuşlardır.

Kunin vd., (2016), fraktal kesimli malzemelerin statik ve dinamik elastik özelliklerini incelemişlerdir. Elastik sabit tensörünün simetrisini, deformasyonun elastik limitini ve dolayısıyla elastik tepkileri manipüle etmek için, fraktal kesim düzeylerinin ve kesim modellerinin değişiminin nasıl kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları fonon hesaplamalarına dayalı olarak, belirli bir fraktal kesim yapısının akustik iletim spektrumunu tahmin etmiş ve bu tahminleri 3D baskı ile yapılan deneyler ve ses zayıflatma testleriyle doğrulamışlardır.

Demirci vd., (2020), LiTaO_3 /kauçuk tabanlı multiferroik malzemelerde bant yapısını ve elastik dalga iletimini, Sierpinski halı fononik kristali temel alarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarına göre, önerilen fononik kristalin topolojik yalıtkan özelliklere sahip olduğunu ve piezoelektrik çubuklara voltaj uygulandığında, bu kristalin dalgaları yönlendirme konusunda aktif olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Özer vd., (2020), multiferroik tabanlı Sierpinski halı fononik kristalinin bant yapısını ve iletim spektrumlarını sonlu elemanlar simülasyonu kullanarak incelemişlerdir. Kare örgü yapısına sahip fononik kristal, dairesel ve üçgen kesitli piezoelektrik çubuklardan oluşan bir kauçuk matris içinde tasarlanmış

ve bant yapıları elde edilmiştir.

Son çalışmalar, fononik kristallerin tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu dahil olmak üzere çeşitli yönlerini araştırmıştır. Örneğin, araştırmacılar gözenek şekillerinin iki boyutlu fononik kristallerdeki bant aralığı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve normalize edilmiş boşluk boyutunun yapıdaki minimum bağ genişliğine büyük ölçüde bağlı olduğunu bulmuşlardır (Paul vd., 2024). Ek olarak, mikrofabrikasyon tekniklerindeki ilerlemeler, yüksek kaliteli, tek kristalli hipersonik fononik kristallerin oluşturulmasını sağlayarak, Brillouin ışık saçılımı kullanılarak fononik bant yapılarının doğrudan ölçülmesine olanak tanımıştır (Gorishnyy vd., 2005). İlginç bir şekilde, birçok teorik çalışma tek boyutlu fononik kristallerde tutarlı etkiler nedeniyle termal iletkenlikte bir azalma öngörürken, oda sıcaklığında yapılan deneysel gözlemler genellikle ısı iletiminin öncelikli olarak tutarsız olduğu sonucuna varmaktadır (Anufriev vd., 2021). Bununla birlikte, süper kafesler ve karbon nanotüpler üzerindeki deneyler, birkaç nanometrelik periyodikliğe sahip yapılarda oda sıcaklığında bile tutarlı ısı iletimi olduğuna dair kanıtlar göstermiştir. Bu da daha fazla minyatürleştirme ve iyileştirilmiş üretim kalitesinin bu alanda ilerlemek için temel zorluklar olduğunu göstermektedir (Anufriev & Nomura, 2018; Anufriev vd., 2021).

Fononik kristaller, geniş bir frekans spektrumunda akustik ve mekanik dalgaları manipüle etmek için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Fotonik kristallere benzeyen bu yapay periyodik yapılar, girişim etkileri yoluyla fononların yayılmasını kontrol edebilir (Anufriev vd., 2021; Vasileiadis vd., 2021). Son araştırmalar, uygulamalarını sismik dalgalardan ve duyulabilir sesten, telekomünikasyon ve terahertz aralığında termal taşıma için gigahertz fononiklerine genişletmiştir (Vasileiadis vd., 2021). Ses yalıtımının önemi ve fononik kristallerin kullanımı, gürültünün insan sağlığına olan etkileriyle ilgili önemli bir bağlama sahiptir. Dr. Çiğdem Güner tarafından yapılan bir çalışma, gürültünün insan sağlığına olan olumsuz etkilerini araştırır. Gürültü, işitme kayıplarına yol açabilen en yaygın meslek hastalıklarından biri olarak kabul edilir. Özellikle yüksek frekansta ve yüksek şiddetteki gürültü, kalıcı işitme kayıplarına neden olabilir. İşitme sistemine zarar veren kabul edilebilir gürültü seviyelerini belirtir ve bu seviyelerin insanların işitme yeteneklerini nasıl etkileyebileceğini açıklar. Ayrıca, gürültünün psikolojik, nörolojik ve kardiyovasküler sistemlere olan etkilerini de incelemektedir.

Fononik kristaller üzerine yapılan güncel çalışmalar geniş bir uygulama ve frekans yelpazesini kapsamaktadır. Araştırmacılar, ses emilimi (Zhang vd., 2020),

termal iletkenlik azaltımı (Anufriev & Nomura, 2018) ve hatta nanometre ölçekli katmanlı yapılardaki fleksoelektrik etkiler (Yang vd., 2017) potansiyellerini araştırmaktadırlar. Mikrofabrikasyon ve mikroişleme gibi gelişmiş üretim teknikleri, VHF (Very High Frequency) frekanslarında ve ötesinde çalışan mikro-fononik kristallerin geliştirilmesini sağlamıştır (Iii & El-Kady, 2008). Ek olarak, topoloji optimizasyon algoritmaları, üç boyutlu fononik kristaller için optimum bant aralığı yapıları tasarlamak için kullanılmaktadır (Li vd., 2016; Li vd., 2019). Alan ilerledikçe, fononik kristaller kablosuz iletişim, termal yönetim ve akustik görüntüleme uygulamaları için umut vericidir. Devam eden araştırmalar mevcut sınırlamaların üstesinden gelmeyi ve pratik kullanımlarını genişletmeyi amaçlamaktadır.

Son yıllarda, akustik metamateriyaller ve fononik kristaller üzerine yapılan çalışmalar, sesin yönlendirilmesi, yalıtılması ve görüntülenmesi gibi çeşitli uygulamalar açısından büyük bir ilgi görmektedir. Bu kapsamda Palaz (2020), GeTe tabanlı topolojik malzeme ile düşük moleküler ağırlıklı sıvı kristal polimer (LMWLCS) matrisinde oluşturulan iki boyutlu fononik kristallerin bant yapısını hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, kare ve bal peteği örgüsüne sahip yapılar için Floquet periyodiklik koşulları altında FEM yöntemi ile bant aralıkları hesaplanmış; belirli frekans aralıklarında tam bant aralıkları gözlemlenmiştir. Özellikle topolojik malzeme fazlarının birim hücre içindeki dağılımının, yapının dispersif özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve bu yapıların akustik dalgaların yönlendirilmesi ve kontrolü açısından işlevsel kullanılabileceği vurgulanmıştır. Bu tür çalışmalar, polimer tabanlı akustik metamateriyallerin hem tasarımı hem de performans karakterizasyonu açısından güçlü bir temel sağlamaktadır (Palaz, 2020).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Teori

FKr'de (Fononik Kristaller) gözlemlenen bant aralıkları, elektronların periyodik potansiyellerdeki enerji bant yapılarına benzer şekilde ortaya çıkar. Elektron dalgalarının Bragg saçılmasına maruz kalması, fononik yapılarda da benzer bir etkiye yol açar (Elford vd., 2010).

İki farklı bileşenden oluşan periyodik bir yapıda, birim hücre boyutunun $a/2$ olduğu durumlarda, akustik dalgaların yayılım hızının konuma bağlı değiştiği bölgelerde zarf fonksiyonunun maksimum ve minimum noktaları tespit edilebilir. Aynı k dalga vektörüne karşılık gelen iki farklı $\omega(k)$ frekans modunun bulunması, dispersiyon eğrisinde çift değerli bir yapı olduğunu gösterir. Fononik bant aralığının genişliği ise, ortamdaki farklı fazların ses hızları arasındaki farkla doğrudan bağlantılıdır. Sıvı-katı etkileşiminin gözlendiği fononik kristal sistemlerinde, katı fazın yüksek elastik modülü nedeniyle mekanik dalga enerjisinin büyük ölçüde sıvı faz içinde yayıldığı hem deneysel hem de teorik çalışmalarla doğrulanmıştır.

z -ekseni boyunca uzanan silindirik fononik kristallerde (FKr), mekanik özellikler xy düzleminde periyodik olarak değişirken, z yönünde homojen bir dağılım gösterir. Bu tür yapılarda, katı ve akışkan bileşenlerin periyodik dizilimi sonucu oluşan akustik Bloch dalgalarının yayılımı, temel akustik dalga denklemi (Denklem 3.1) kullanılarak analiz edilebilir.

$$\left[\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(\vec{r})} \nabla p_k(\vec{r}, t) \right) \right] = - \frac{1}{\rho(\vec{r}) c^2(\vec{r})} \omega^2(\vec{k}) p_k(\vec{r}, t) \quad (3.1)$$

Bu denklemde, $\rho(\vec{r})$ malzemenin yoğunluğunu, $c(\vec{r})$ FKr içindeki akustik dalganın boyuna hızını ve $p_k(\vec{r})$ fononik kristal içinde yayılan akustik dalganın, hem zamana hem de konuma bağlı olarak nasıl değiştiğini tanımlar (Bloch tipi çözüm). $\omega(\vec{k})$ ise dispersiyon ilişkisine bağlı açısal frekansıdır. Buradaki $\vec{k}$ ise bu dalganın dalga vektörüdür, yani dalganın yayılma yönünü ve uzunluğunu belirler. Bu denklemi iki boyutta tekrar düzenlersek fononik kristalde dalga denklemi denklem 3.2'deki hale gelir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = -\frac{1}{\rho c^2} \left[\omega(\vec{k}) \right]^2 p \quad (3.2)$$

$\rho = \rho(x,y)$ ve $c = c(x,y)$ iki boyutlu fononik kristalin mekanik özelliklerini ve p uzaysal basıncı $p_k(x,y)$ temsil etmektedir. Periyodik yapıdaki fononik bant boşluğunun bulunduğu frekans aralığında bir mekanik dalga oluştuğunda, bu dalga, yapının periyodik özellikleri nedeniyle ilerleyemez ve tamamen geri yansır. Eğer mekanik dalga fononik kristalin içinde meydana gelirse, kristal bu dalgayı hapsederek yayılmasını engeller.

3.2. Fononik Kristal ve Ters Örgü

Katı hal fiziğinde ve kristalografi alanında ters örgü (reciprocal lattice), gerçek uzaydaki bir kristal örgüsünün Fourier dönüşümüyle elde edilen matematiksel bir yapısıdır. Dalga vektörleri uzayında (k -uzayı) tanımlanır. Özellikle, x-ışını kırınımı, elektron saçılması, fonon ve elektron enerji bantları gibi konuların analizinde kritik rol oynar.

Bant yapısını elde etmek için kullanılan yöntemlerden bir tanesi de Düzlem Dalga Yöntemi (PWE-Plane Wave Expansion) dir. Düzlem Dalga Yöntemi(PWE) , özellikle periyodik yapıların (fotonik kristaller, akustik meta malzemeler vb.) elektromanyetik veya elastik dalga davranışını analiz etmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Temel olarak, Maxwell denklemlerini veya dalga denklemlerini Fourier uzayında çözerek bant diyagramlarını (frekans vs. dalga vektörü) hesaplar.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Geometrik açıdan karmaşık saçılım problemleri ve heterojen malzeme özellikleri, analitik yöntemlerin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu gibi durumlarda, sayısal simülasyon teknikleri büyük bir önem kazanmaktadır. Fononik kristallerin dinamik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, periyodik yapıların özdeğer analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile etkili bir şekilde gerçekleştirilmiştir. FEM'in bu bağlamdaki üstünlükleri şöyle özetlenebilir: Periyodiklik koşullarının matematiksel olarak tutarlı bir şekilde modelleyebilen, hesaplamalı verimlilik ile yüksek doğruluk dengesinin sağlayan, dispersiyon eğrilerinin ve mod şekillerinin sistematik olarak karakterize edebilen bir yöntemdir. Bu yaklaşım, özellikle Brillouin bölgesi analizlerinde ve bant yapısı hesaplamalarında belirgin avantajlar sağlamaktadır. Nümerik yöntemlerin bu esnekliği, fononik kristal tasarımında karşılaşılan teorik zorlukların aşılmasına

önemli katkılar sunmaktadır.

FEM, başlangıçta sınırlı tanım bölgelerindeki kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü amacıyla formüle edilmiştir ve özellikle Helmholtz denklemlerinin çözümünde etkin bir şekilde uygulanabilmektedir. Periyodik yapıların incelenmesi bağlamında, bant yapılarının belirlenmesi amacıyla çözülen özdeğer problemleri, temelde birer sınır değer problemidir. FEM sonsuz ortamlarda dalga yayılımını simüle etmek için kullanıldığında, hesaplamalar fiziksel olarak sonsuz bir ortamda yapılamayacağından, bu ortam yapay olarak sonlu bir alanla temsil edilir. Bu nedenle, dalgaların dışarıya doğru serbestçe yayılabilmesi ve kenarlardan geri yansımaların önlenmesi amacıyla, hesaplama alanının sınırlarında özel sınır koşulları (örneğin PML – Mükemmel Eşleşmiş Katman) tanımlanır. Bu yapay sınır koşulları sayesinde, dalgaların doğal yayılımı bozulmadan modellenebilir. Böylece, fiziksel gerçekliğe uygun ve güvenilir sayısal sonuçlar elde edilir.

Bu çalışmada, modelleme ve sayısal analiz süreçlerinde COMSOL Multiphysics 5.4 yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, kapsamlı fiziksel sistemlerin entegre biçimde simülasyonuna olanak tanımaktadır. İleri düzey geometrik modelleme yeteneklerine sahiptir. Çoklu fizik alanlarını eşzamanlı olarak çözümleyebilir. Ağ yapılarının oluşturulmasında optimize edilmiş algoritmalar sunar. Bu sayede hesaplama verimliliği artırılabilir. Ayrıca elde edilen sonuçların ayrıntılı şekilde analizine ve görsel sunumuna imkân tanıyan gelişmiş araçlar içermektedir. Tüm bu özellikler, yazılımın bu çalışmada tercih edilmesinin temel gerekçelerini oluşturmaktadır.

İki boyutlu periyodik sistemlerin analizinde ,değişkenlere ayırma yöntemi, temel diferansiyel denklemi iki bağımsız bileşene ayırmaktadır. Bu bileşenlerden ilki periyodik yapının hakim olduğu düzlemi, ikincisi ise homojen özelliklerin bulunduğu ve serbest uzay koşullarının geçerli olduğu düzlemi temsil etmektedir. Bu metodolojik yaklaşım, karmaşık problemlerin daha basit alt problemlere indirgenerek çözülmesine olanak tanımaktadır.

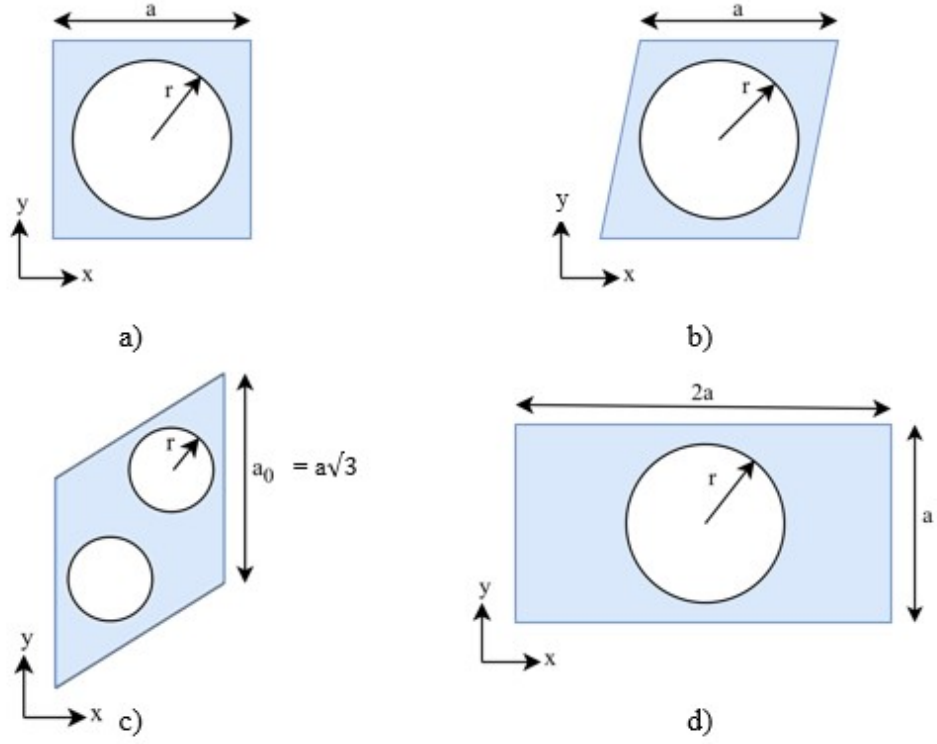
3.4. Nümerik (Sayısal) Yöntem

Bu çalışmada, fononik kristal yapıların akustik performansının incelenmesine yönelik olarak hem bant yapısı hesaplamaları hem de iletim kaybı analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler COMSOL Multiphysics 5.4 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde sadece 'Pressure Acoustics, Frequency Domain' fizik modülü tercih edilmiş ve analizler iki

boyutlu (2D) düzlemde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, örgü tipi olarak kare, dikdörtgen, üçgen ve bal peteği geometrilerinde periyodik yapılar oluşturulmuş, bu yapıların bant yapıları ve iletim kayıpları detaylı olarak incelenmiştir.

3.4.1. Bant yapısının hesaplanması

Bant yapılarının elde edilmesi için öncelikle sonsuz bir fononik kristal varsayımı ile birim hücre analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1 de simülasyonda kullanılan birim hücreler görülmektedir.



Şekil 3.1. Birim hücreler, a) kare örgü, b) üçgen örgü, c) bal peteği örgü, d) dikdörtgen örgü.

Her bir örgü için a_1 , a_2 ve a_3 temel örgü vektörleri (Çizelge 3.1) olmak üzere bant yapısının elde edilmesi amacıyla denklem 3.3, denklem 3.4 ve denklem 3.5'e göre ters örgü vektörleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. Temel örgü vektörleri.

	$\vec{a}_1$	$\vec{a}_2$	$\vec{a}_3$
Kare örgü	$a\hat{x}$	$a\hat{y}$	0
Dikdörtgen Örgü	$a\hat{x}$	$b\hat{y}$	0
Üçgen Örgü	$a\hat{x}$	$a\left(\frac{1}{2}\hat{x} + \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{y}\right)$	0
Bal peteği Örgü	$a\left(\frac{3}{2}\hat{x} + \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{y}\right)$	$a\left(\frac{3}{2}\hat{x} - \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{y}\right)$	0

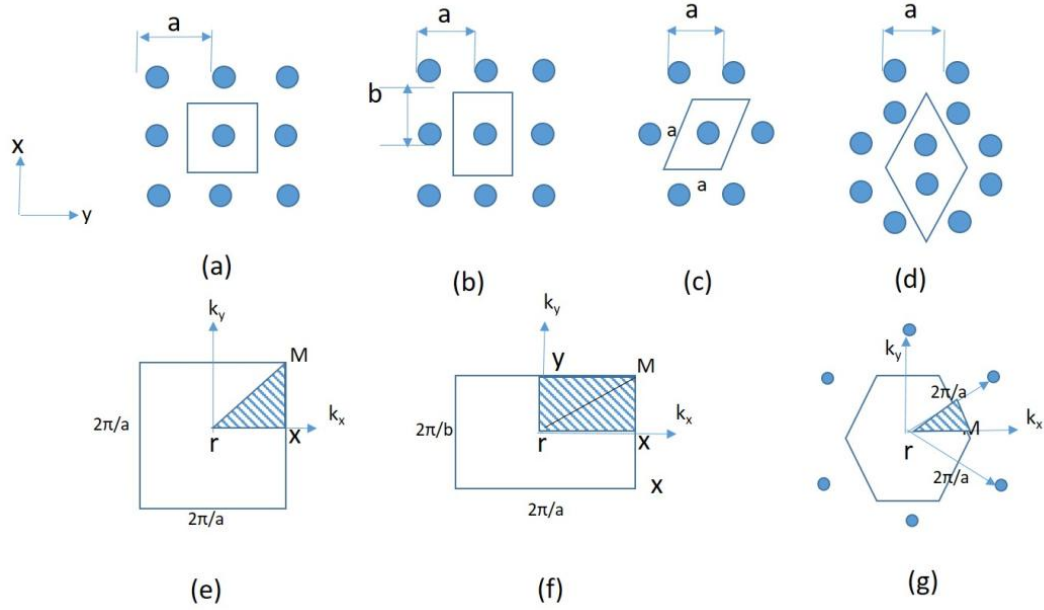
$$\vec{b}_1 = 2\pi \frac{\vec{a}_2 \times \vec{a}_3}{\vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3)} \quad (3.3)$$

$$\vec{b}_2 = 2\pi \frac{\vec{a}_3 \times \vec{a}_1}{\vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3)} \quad (3.4)$$

$$\vec{b}_3 = 2\pi \frac{\vec{a}_1 \times \vec{a}_2}{\vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3)} \quad (3.5)$$

Her bir örgü tipi için, birim hücre geometrileri oluşturulmuş ve şekil 3.1’de kare ve üçgen örgüler için verilen ters örgü hücrelerin kenarlarına Floquet-Bloch periyodik sınır koşulları uygulanmıştır. Bu sınır koşulları sayesinde, sonsuz periyodik yapının bir dilimi temsil edilerek, farklı dalga vektörlerine (k_x ve k_y) karşılık gelen özdeğer problemleri çözülmüştür. Bu şekilde elde edilen çözümler, yapının bant aralıklarını (band gaps) belirlemek için kullanılmıştır.

Her bir birim hücre, merkezine yerleştirilen polimer malzemeden yapılmış silindirik borular ve çevresindeki hava ortamı ile tanımlanmıştır. Polimer malzemeden yapılmış boruların kendisi akustik dalga iletimine engel olacağından, içleri hesaplamaya dahil edilmemiştir. Bu nedenle, borular içi boşluk olarak modellenmiş ve sadece çevresindeki hava ortamı çözüm alanı olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında daha gerçekçi bir modelleme sağlamaktadır.



Şekil 3.2. Farklı örgü türlerine sahip iki boyutlu fononik kristaller ve bunlara karşılık gelen birinci Brillouin bölgeleri: (a) Kare örgü. (b) Dikdörtgen örgü. (c) Düzenli üçgen örgü. (d) Altıgen örgü. (e) Kare örgü için birinci Brillouin bölgesi. (f) Dikdörtgen örgü için birinci Brillouin bölgesinin birinci çeyreği. (g) Düzenli üçgen ve altıgen örgüler için birinci Brillouin bölgesi.

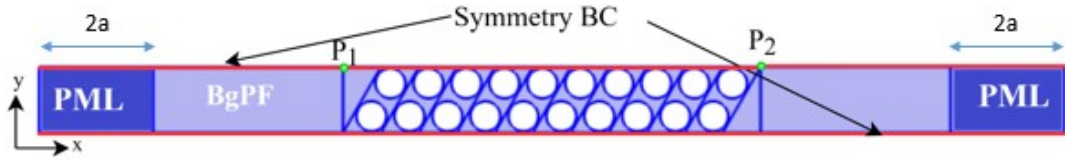
Tüm analizlerde örgü sabiti a ve boru yarıçapı r olmak üzere sabit geometrik parametreler kullanılmıştır. Kare örgüde örgü sabiti a ; 50, 60 ve 75 mm, dikdörtgen örgüde örgü sabiti a ; 50, 60 ve 75 mm ; b ; 100, 120 ve 150 mm, üçgen ve bal peteği örgülerde a ; 50, 62.5 ve 80 mm, bu örgü sabitlerine sahip birim hücreler içindeki boru yarıçapı r , sırayla; 20, 25 ve 63 mm olarak alınmıştır. Her örgüye ait bant yapısının çıkarılması için, birinci Brillouin bölgesinin kenarları boyunca dalga vektörleri taranmış ve her bir vektöre karşılık gelen izinli rezonans frekansları belirlenmiştir. Elde edilen bant diyagramları, yapıların akustik bant aralık karakteristiğini ortaya koymaktadır.

Modelin sonlu elemanlara bölünmesinde FEM'nun varsayılan 'Normal' mesh ayarı kullanılmıştır. Bu ayar, çözümün kararlılığı ve hesaplama süresinin optimize edilmesi açısından yeterli doğrulukta sonuçlar sağlamıştır.

3.4.2. İletim kaybının hesaplanması

İletim kaybı analizleri, sonlu yapılar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Her bir örgü tipi için 1 birim genişliğinde ve 10 birim uzunluğunda birim hücrelerden oluşan bir yapı modellenmiştir. Bu yapının giriş ve çıkış bölgelerine, her biri $2a$ uzunluğunda olacak şekilde Perfectly Matched Layer (PML) sınır koşulları uygulanmıştır. PML bölgeleri, yapı dışına çıkan ses dalgalarının yansımalarını önleyerek, sonsuz ortam koşulları altında simülasyon yapılmasına olanak tanır (Şekil 3.3).

Yapının giriş bölümüne düzlem dalga üretmek amacıyla bir "Background Pressure Field" (BgPF) sınır koşulu tanımlanmıştır. Bu sayede yapı boyunca x-ekseni yönünde yayılan bir düzlem basınç dalgası oluşturulmuştur. Yapının üst ve alt kenarlarına simetrik davranışı sağlamak için 'Symmetry' sınır koşulları atanmıştır. Böylece sadece temel yayılım modlarının çözülmesi sağlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Üçgen örgü için iletim kaybının hesaplanmasında kullanılan sonlu yapı ve sınır koşulları.

Frekans taraması, 100 Hz ile 20 kHz aralığında olacak şekilde yapılmış ve bu frekanslara karşılık gelen iletim kaybı değerleri hesaplanmıştır. Yapının giriş (P_1) ve çıkış (P_2) bölgelerine yerleştirilen noktalardan alınan basınç genlikleri kullanılarak iletim kaybı aşağıdaki denklem 3.6 de formül ile hesaplanmıştır:

$$TL(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3.6)$$

Bu formül, frekanslara bağlı olarak yapının ne kadar ses zayıflattığını göstermektedir. Özellikle bant aralık bölgelerinde iletim kaybı yüksek değerler alırken, rezonans frekanslarında iletim artışı gözlemlenmiştir.

3.5. Modelleme ve Meshleme Detayları

Birim hücre ve sonlu yapı modellerinde kullanılan tüm geometriler sonlu

elamanlar yazılımının CAD arayüzü üzerinden oluşturulmuştur. Her bir yapıda kullanılan polimer boruların dış çapı $2r$, merkezden merkeze mesafeleri ise a olarak sabitlemiştir. Yapının tamamı hava ortamı içerisinde modellenmiş, polimer silindirik borular polimer silindirik borular içi boş olmasına rağmen bant yapısını değiştirmeyeceği için içi katı olarak modellenmiş ve bulunduğu bölgeler çözüm alanı dışı bırakılmıştır.

Sonlu yapının her iki ucu, yansısız ortam koşullarını sağlamak için PML bölgeleriyle desteklenmiştir. Bu sayede, dalgaların yapıdan çıktıktan sonra geri yansıması engellenmiş ve gerçekçi bir yayılım ortamı sağlanmıştır. Kullanılan mesh yapısı, hem hesaplama süresini artırmayacak kadar sade hem de sonuçların doğruluğunu koruyacak kadar detaylı olacak şekilde 'Normal' ayarlarla otomatik oluşturulmuştur.

Analizlerde elde edilen tüm sonuçlar, MATLAB ve Excel ortamlarında işlenmiş, bant aralıkları grafiklerle gösterilmiş ve frekansa bağlı iletim kayıpları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

3.6. Test Sinyalinin Üretilmesi

FKr yapısının farklı frekanslardaki akustik davranışlarını gözlemlemek amacıyla, doğrusal olarak frekansı artan bir test sinyali (linear chirp) kullanılmıştır. Başlangıç frekansı 100 Hz ve bitiş frekansı 20 kHz olan bu sinyal, 5 saniye süreyle 44.1 kHz örnekleme frekansı ile MATLAB ortamında oluşturulmuştur. Sinyalin başında ve sonunda ani genlik geçişlerinden kaynaklanabilecek spektral bozulmaları önlemek için 100 ms süreyle fade-in (yavaş başlangıç) ve fade-out (yavaş bitiş) işlemleri uygulanmıştır. Sinyal daha sonra hoparlör aracılığıyla ortama yayılmıştır.

3.7. Deneysel Kurulum ve Ölçüm Süreci

Deneysel çalışmalar kapsamında, hava matrisi içerisinde farklı örgü yapılarına sahip (kare, dikdörtgen, üçgen ve bal peteği) iki boyutlu (2D) fononik kristaller tasarlanmış ve her biri için deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 3.5'te gösterilen deney düzeneğine benzer sistemler kurulmuş ve içi boş 100 adet polimer silindirin 10×10 düzenlemesiyle dört farklı örgü tipine sahip kristal yapılar oluşturulmuştur.

İlk aşamada, kare örgüye (Şekil 3.6) sahip yapılar için üç farklı örnek hazırlanmıştır. Bu örneklerde silindir yarıçapları sırasıyla $r_1 = 20$ mm, $r_2 = 25$ mm ve $r_3 = 31.5$ mm (Şekil 3.10); örgü sabitleri ise $a_1 = 50$ mm, $a_2 = 60$ mm ve $a_3 = 75$ mm

olarak belirlenmiştir. Et kalınlıkları sırasıyla $D_1 = 6.7$ mm, $D_2 = 8.3$ mm ve $D_3 = 10.5$ mm (Şekil 3.10), uzunlukları ise tüm örneklerde sabit olarak $L = 500$ mm'dir (Çizelge 3.2). Deney düzeneğinde kullanılan alt tabla, 36 mm kalınlığında MDF (Medium Density Fiberboard) platform kullanılmıştır. Her bir örneğe uygun MDF platform üzerinde 10x10 yani 100 tane uygun yarıçaplarda delikler açılıp ve kullanılacak polimer silindir boruların bir ucu kapalı hale getirilmiştir. Daha sonra polimer silindirlerin kapalı uçları MDF platformlar içerisinde kalacak şekilde örgü dizilimleri yapılmıştır.

Aynı yaklaşım, dikdörtgen (Şekil 3.7), üçgen (Şekil 3.8) ve bal peteği (Şekil 3.9) örgü tipleri için de uygulanmıştır. Bu yapılarda da silindir sayısı, uzunluğu ve düzenlemesi sabit tutulmuş, yalnızca örgü tipi ve örgü sabiti değiştirilmiştir. Böylece, farklı geometrik dizilimlerin ses iletimine etkisi doğrudan karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir.

Deneyssel çalışmamızda, 100 Hz–10000 Hz frekans aralığında sinüzoidal ses sinyalleri üretebilen bir yazılım kullanılmıştır. Bu sinyaller, hoparlör aracılığıyla belirli bir süre boyunca ($t = 5$ s) fononik kristal yapılarına yönlendirilmiştir. Test sinyalinin ortamda oluşturulmasının ardından, sesin fononik kristal içerisinde geçiş davranışını analiz etmek amacıyla mikrofonla iki ayrı konumda ölçüm alınmıştır. İlk ölçüm, kristalin giriş (ön) tarafından; ikinci ölçüm ise çıkış (arka) tarafından alınarak gerçekleştirilmiştir.

Her iki durumda da kayıt işlemi, sinyal çalınmadan hemen önce başlatılmış ve sinyal süresi boyunca devam etmiştir. Kayıt işlemleri MATLAB yazılımı içerisinde audiorecorder fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve mikrofon ile alınan veriler, Last Voice PH 1000 model harici ses kartı (Şekil 3.4) aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Kristal yerleştirilmeden önceki akustik basınç verisi P_1 , yerleştirildikten sonraki verisi ise P_2 olarak tanımlanmış; bu veriler FFT (Fast Fourier Transform) algoritmasıyla analiz edilmiştir. Ölçüm ve frekans dönüşümü Ek 1 deki deneyssel dönüşüm algoritmasına göre yapılmıştır.

Her örgü tipi için iletim kaybı değerleri hesaplanmış, elde edilen deneyssel sonuçlar COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) analizleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece, farklı örgü geometrilerinin ve yapısal parametrelerin akustik iletim üzerindeki etkileri deneyssel olarak test edilmiş ve yöntem doğruluğu değerlendirilmiştir.



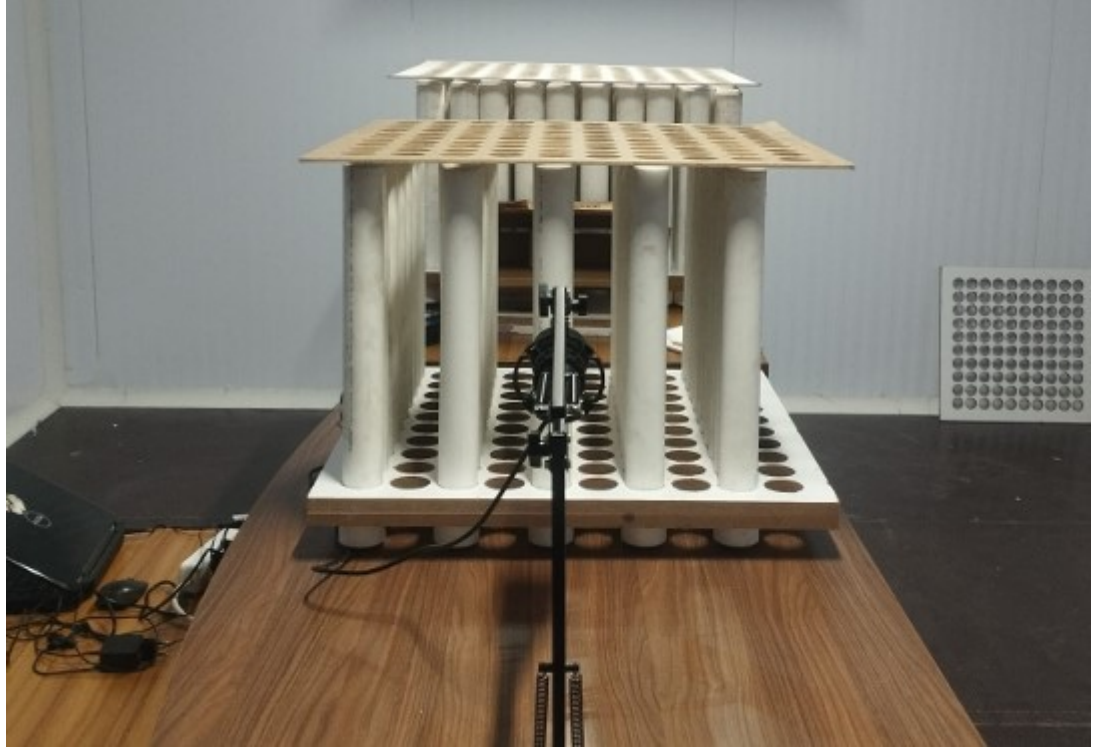
Şekil 3.4. Last Voice PH 1000 model harici ses kartı.



Şekil 3.5. Deney düzeneği.



Şekil 3.6. Kare örgü deney düzeneği.



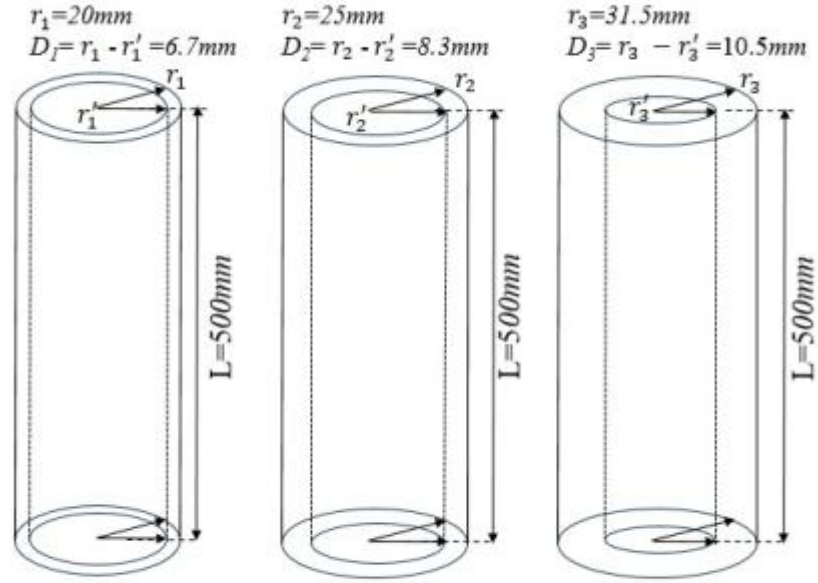
Şekil 3.7. Dikdörtgen örgü deney düzeneği.



Şekil 3.8. Üçgen örgü deney düzeneği.



Şekil 3.9. Bal peteği örgü deney düzeneği.



Şekil 3.10. Kullanılan polimer silindirik boruların şematik gösterimi.

Çizelge 3.2. Kullanılan polimer silindir malzemelerin yarıçapı, et kalınlığı ve örgü parametreleri.

r=Yarıçap(mm)	D=et kalınlığı(mm)	a=Örgü sabiti(mm)	L=Polimer borunun Uzunluğu(mm)
$r_1=20$	$D_1=6.7$	$a_1=50$	500
$r_2=25$	$D_2=8.3$	$a_2=60$	500
$r_3=31.5$	$D_3=10.5$	$a_3=75$	500

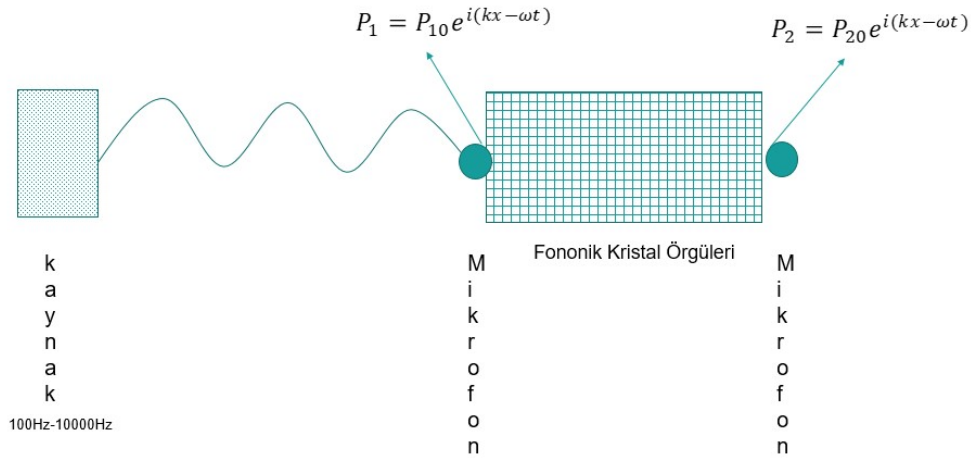
3.8. Sinyal İşleme ve Frekans Analizi

Zamana göre değişimi ölçülen ve kaydedilen ses dalgalarının analizi Fourier analizi yardımıyla frekans uzayında yapılmıştır. Bu dönüşüm Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) algoritması uygulanarak elde edilmiştir. Daha yüksek frekans çözünürlüğü elde edebilmek amacıyla sinyal uzunluğu 2'nin en yakın üst kuvvetine tamamlanarak sıfırlarla doldurulmuştur (zero-padding).

Spektral düzgünleştirme işlemi, genlik spektrumunda gözlemlenen ani değişimlerin etkisini azaltmak ve elde edilen verilerin daha anlamlı şekilde

yorumlanabilmesini sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Bu amaçla, LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing) yöntemi kullanılarak spektral genlik verileri üzerinde yumuşatma yapılmıştır. Alternatif olarak, hareketli ortalama (moving average) veya Savitzky–Golay filtresi gibi yöntemler de bu tür spektral analizlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Düzgünleştirme işleminin ardından, her iki konumda (giriş ve çıkış) elde edilen genlik spektrumları normalize edilerek karşılaştırmalı analiz için uygun hale getirilmiştir. FKr yapısının ses zayıflatıcı etkisi, denklem 3.6 aracılığıyla hesaplanmıştır.

İletim kaybı analizinde, P_1 , yapının ön yüzeyinde (girişte) ölçülen frekansa bağlı basınç genliğini, P_2 ise arka yüzeyde (çıkışta) ölçülen basınç genliğini temsil eder (Şekil 3.11). Bu iki değer arasındaki fark, ses dalgasının yapıdan geçerken ne kadar zayıfladığını gösterir.



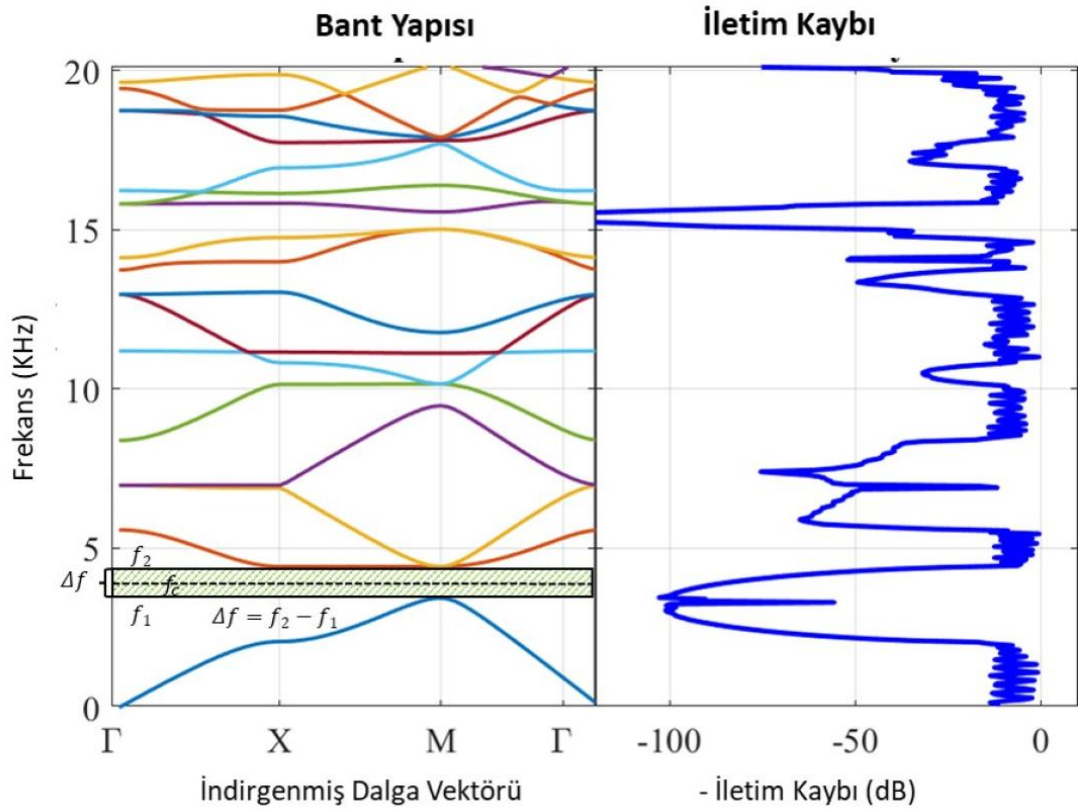
Şekil 3.11. Deney düzeneği simülasyonu.

3.9. Grafiklerin Oluşturulması ve Kayıt

Zaman ve frekans uzayındaki veriler; genlik, dB cinsinden spektrum ve zayıflama eğrisi olmak üzere üç ana kategoride grafikleştirilmiştir. Bu grafikler hem ".tif" hem de ".fig" formatında kaydedilerek ölçüm tarihine göre isimlendirilmiş ve arşivlenmiştir. Ayrıca ölçüm oturumlarına ait tüm değişkenler ".mat" uzantılı dosyalarla kayıt altına alınmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Similasyon ve Deneysel Sonuçları



Şekil 4.1. Örgü sabiti $a_1=50$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Şekil 4.1'deki simülasyon sonuçlarında belirgin iletim kaybı bant aralıkları 3.45–4.43 kHz, 9.47–11.19 kHz ve 13.04–15.81 kHz aralıklarında tespit edilmiştir. Şekil 4.1'de 3.44–4.43 kHz aralığındaki bant genişliği için merkezi frekans f_c gösterilmiştir. Örnek bir hesaplama olarak merkezi frekans; f_1 ve f_2 frekans değerleri bant aralığının maksimum ve minimum değerleri olup aşağıdaki gibi hesaplanarak Çizelge 4.1 oluşturulmuştur.

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 4.43 - 3.45 = 0.98 \text{ kHz}$$

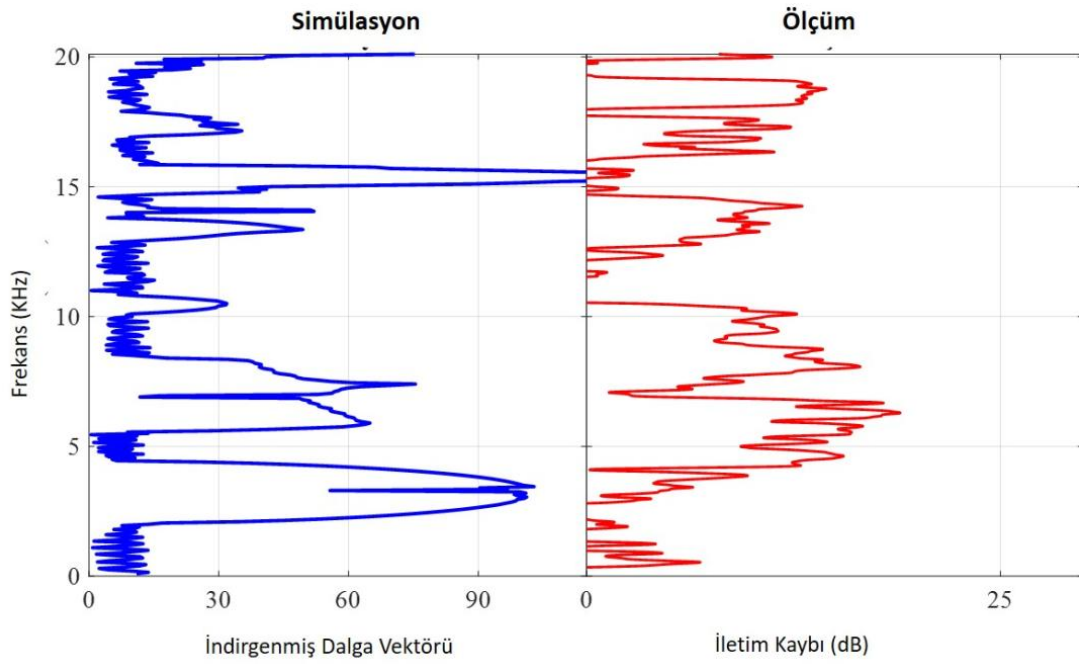
$$\frac{\Delta f}{2} = \frac{0.99}{2} = 0.49 \text{ kHz}$$

$$f_c = 3.44 + 0.49 = 3.93 \text{ kHz}$$

$$\frac{\Delta f}{f_c} \times 100 = \frac{0.98}{3.93} \times 100 \approx \% 24.93$$

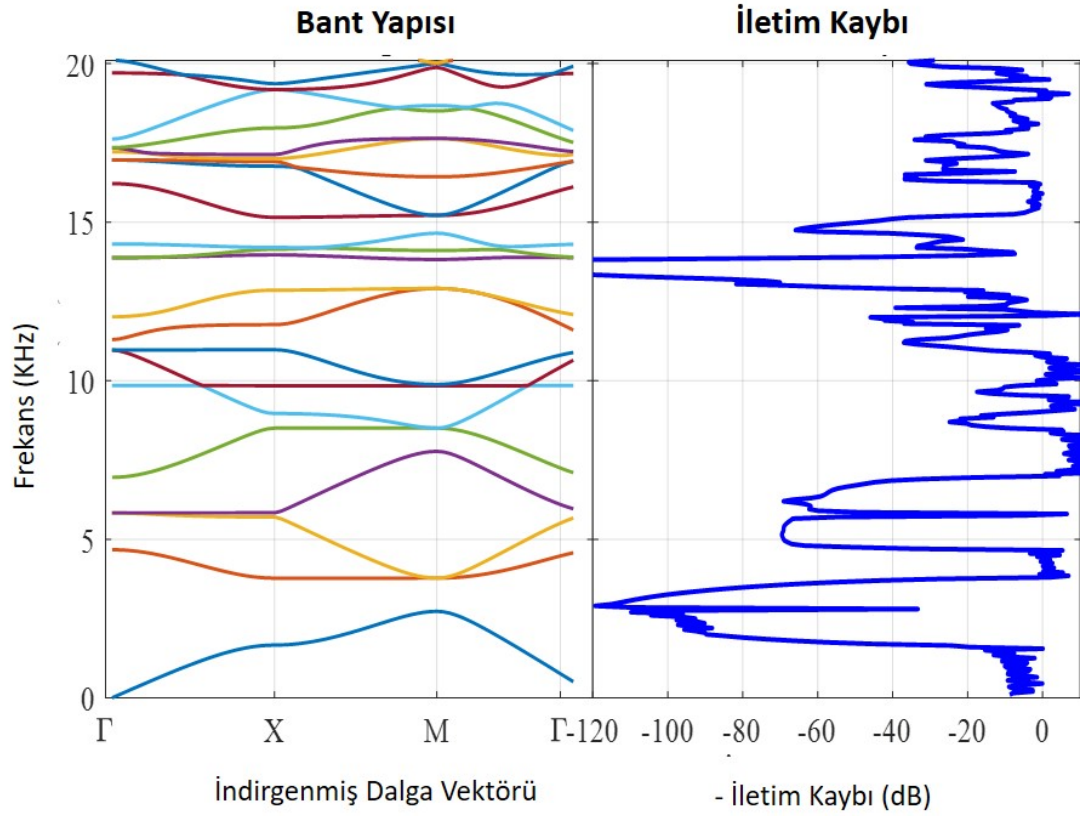
Çizelge 4.1. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.93	0.98	24.93
Bant 2	13.38	0.7	5.22
Bant 3	15.28	0.55	3.57
Bant 4	17.72	0.04	0.2



Şekil 4.2. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.2’de, fononik kristal yapının COMSOL tabanlı sayısal simülasyon sonuçları ile gerçekleştirilen deneysel ölçümler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 3.2–5.3 kHz, 8.7–11.2 kHz ve 12.8–14.2 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Bu tasarım yüksek frekanslı titreşimlerin selektif olarak zayıflatılması gereken hassas elektronik sistemlerde, akustik kaplamalar için uygundur.

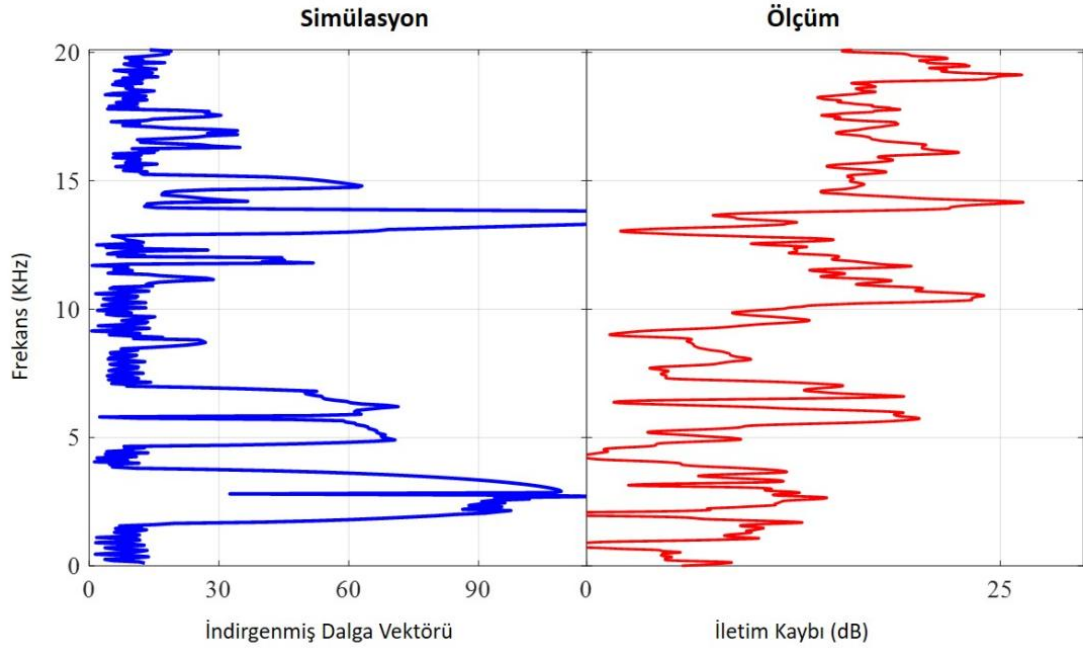


Şekil 4.3. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Şekil 4.3'deki simülasyon sonuçlarında 1.5–3.87 kHz, 12.91–13.88 kHz ve 13–15.15 kHz frekans aralıklarında belirgin bant aralıkları oluşmuştur.

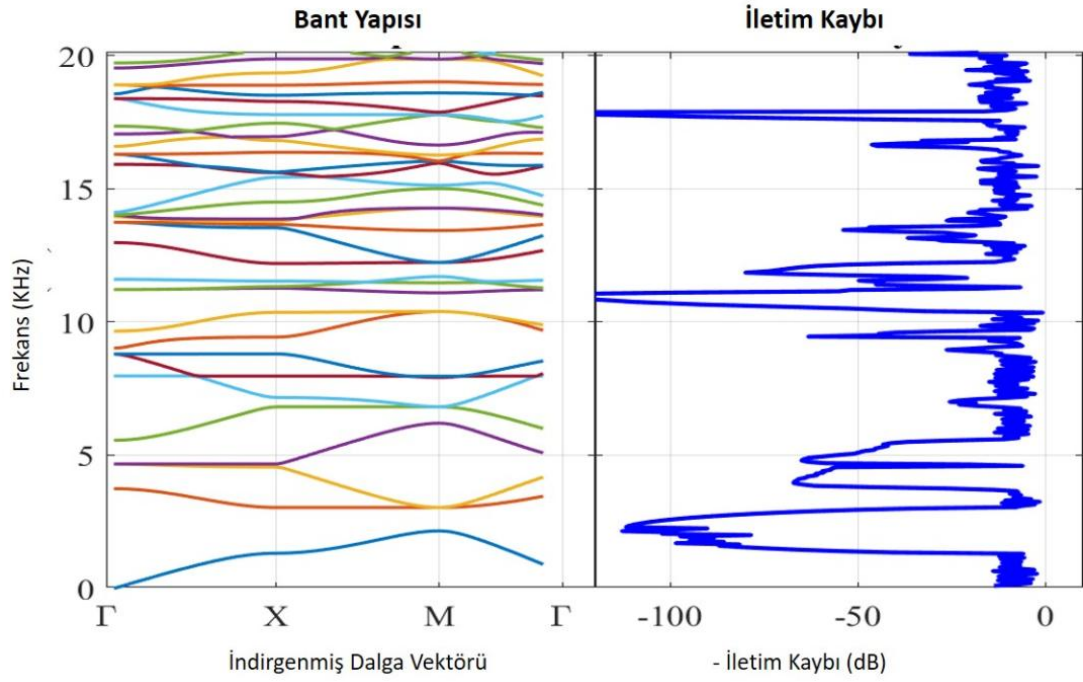
Çizelge 4.2. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.25	1.05	32.22
Bant 2	11.14	0.32	2.86
Bant 3	13.37	0.91	6.83
Bant 4	14.9	0.5	3.36



Şekil 4.4. Örgü sabiti $a_2 = 60$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

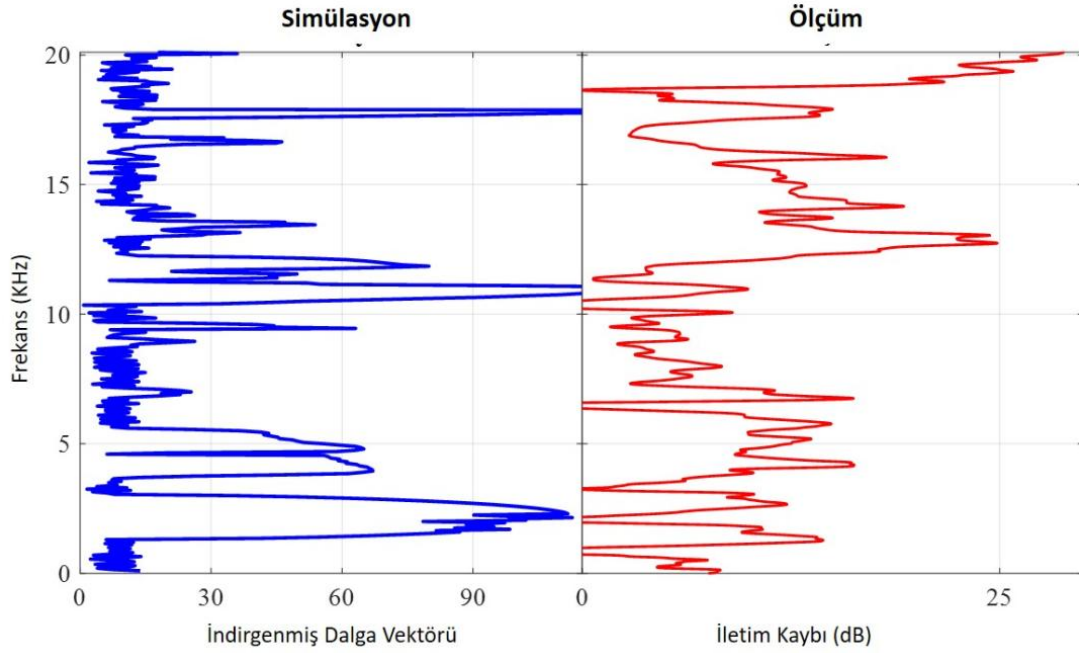
Şekil 4.4’de, simülasyon verileri ile deneysel ölçümler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. İletim kaybı, hem simülasyon hem de deneysel verilerde belirli frekans aralıklarında ciddi oranda artış göstermektedir. Simülasyon sonuçlarına göre oluşan bant aralıkları, deneysel verilerle bu bölgelerle genel olarak uyumlu olup, aynı frekans aralıklarında iletim kaybında ani artışlar gözlenmektedir. Özellikle 13–15.15 kHz bandında deneysel ölçümlerle simülasyon oldukça iyi örtüşmektedir. Artan boyutlar nedeniyle rezonans frekansı daha düşük bir bölgeye (1.86–4.6 kHz) kaymış, bu da yapı içindeki sesin daha uzun dalga boylarıyla etkileştiğini göstermiştir. Yasaklı bant daha geniş olup, frekans spektrumundaki kapsayıcılığı artmıştır. Bu tasarım orta düzeyde yaygın frekanslı gürültülerin (örneğin, endüstriyel motor sesi) bastırılmasında başarılı olabilir.



Şekil 4.5. Örgü sabiti $a_3 = 75$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.3. Örgü sabiti $a_3 = 75$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.60	0.88	33.81
Bant 2	8.91	0.22	2.42
Bant 3	10.74	0.70	6.54
Bant 4	11.95	0.49	4.10

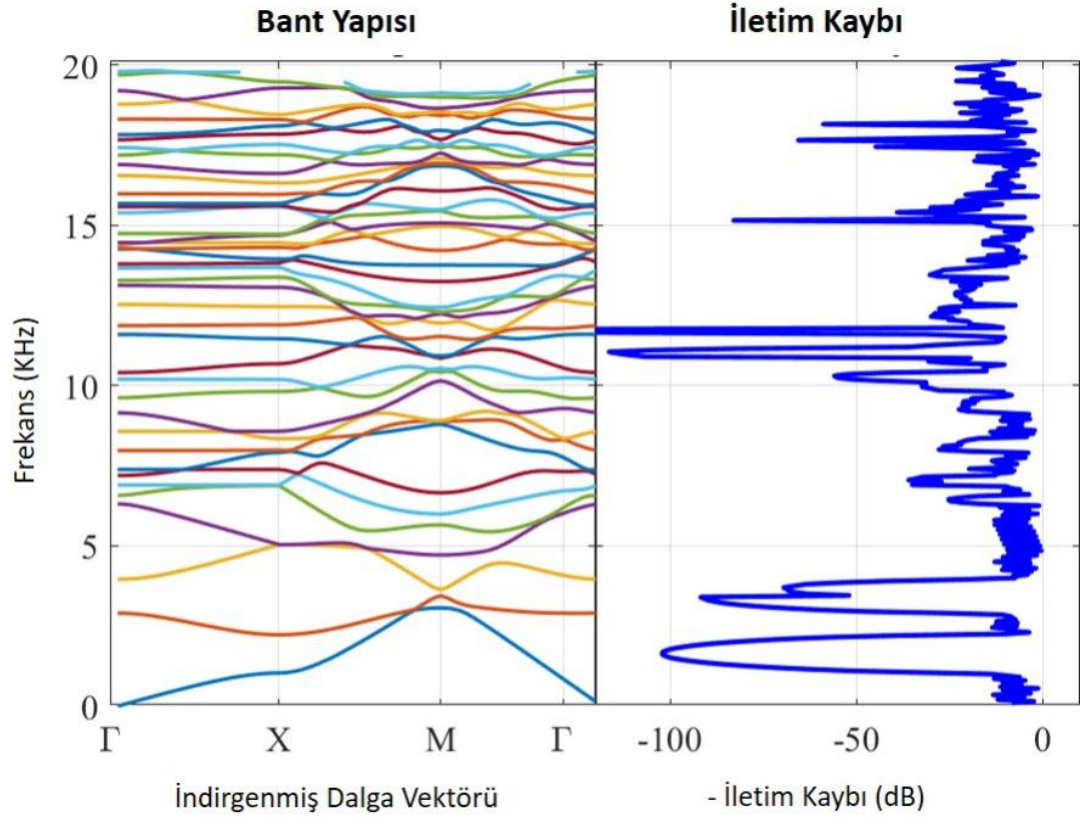


Şekil 4.6. Örgü sabiti $a_3 = 75$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm içi boş silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.5'deki simülasyon sonuçları ve şekil 4.6'deki karşılaştırmalı simülasyon sonuçları ile deneysel ölçümler genel hatlarıyla benzer frekans aralıklarında iletim kaybı göstermektedir. Özellikle 4.6–6.8 kHz, 10.36–11.32 kHz ve 15–17 kHz bantlarında, fononik kristal yapının bant aralıkları net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–6 kHz, 6–7 kHz ve 13–14 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

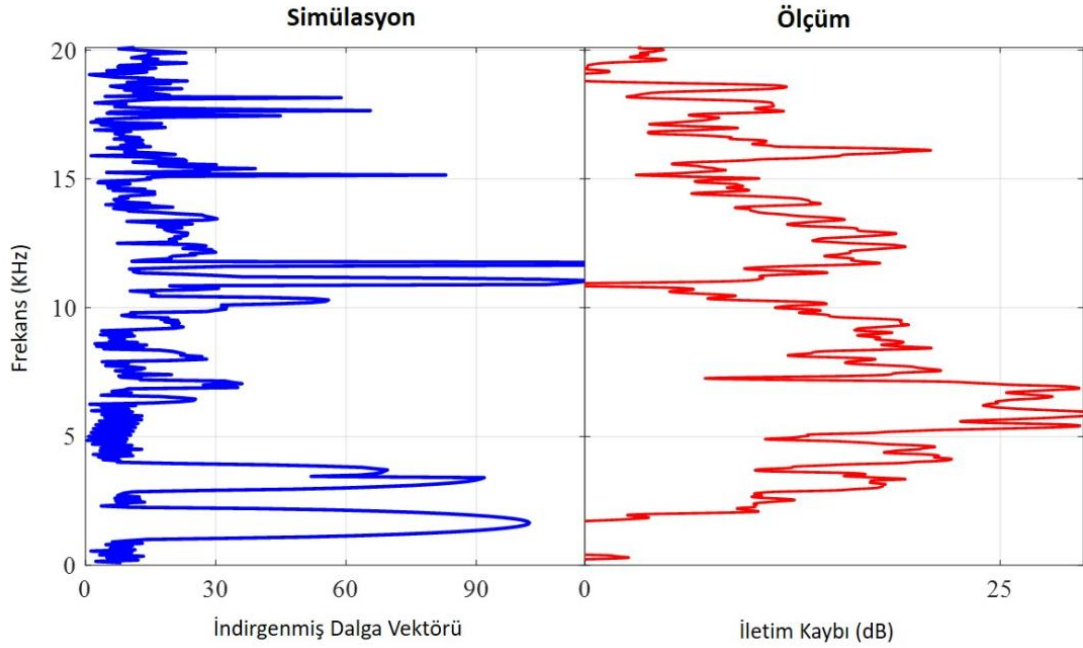
Boyut artışının maksimum seviyeye ulaştığı bu yapı, rezonans koşullarının belirgin şekilde değişmesine yol açmıştır. Daha büyük birim hücre boyutu, ses dalgalarının yapıya nüfuz etmesini kolaylaştırırken, çubukların daha kalın olması nedeniyle iç rezonans artmış ve iletim kaybı yükselmiştir. Frekans: 1.19–3.32 kHz aralığında geniş bir yasaklı bölge gözlenmiştir. Bu tasarım, özellikle düşük frekanslı ortam gürültüsü (ör. jeneratör, dizel motor sesi) için tasarlanabilir.



Şekil 4.7. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1= 100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.4. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1= 100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.54	0.20	5.54

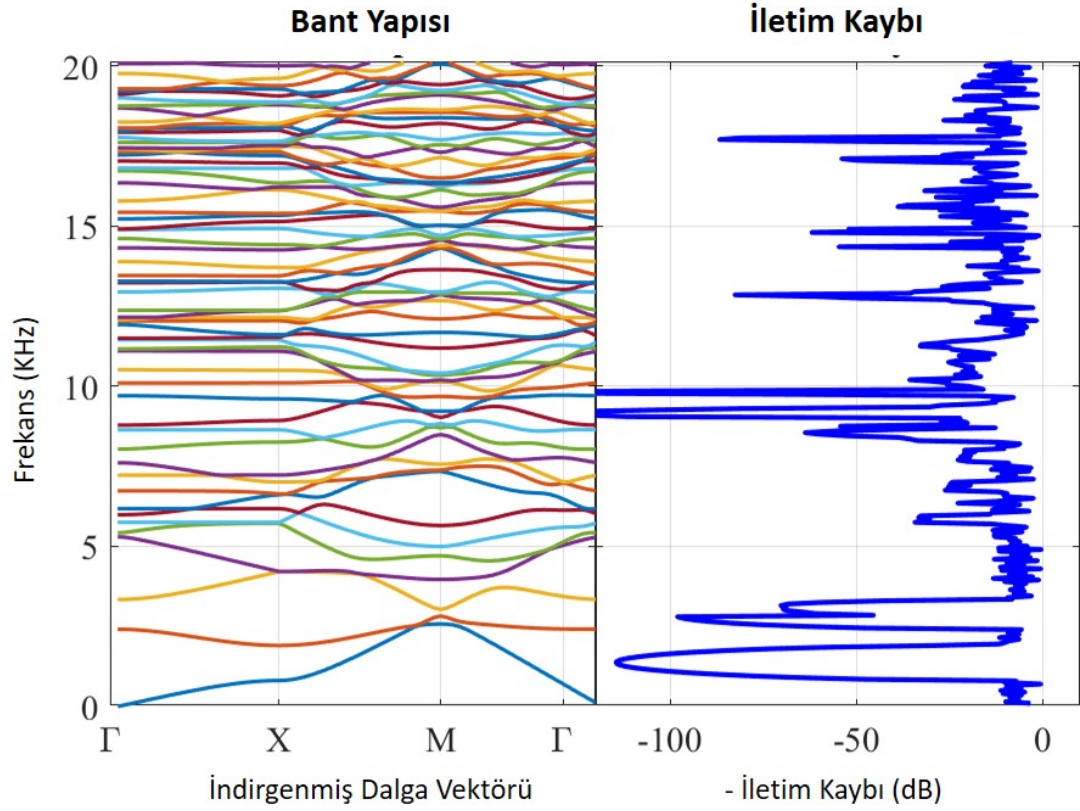


Şekil 4.8. Örgü sabiti $a_1=50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1=20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.7'deki simülasyon sonuçlarına göre, 0.93–2.31 kHz, 2.89–3.95 kHz, 10.63–11.84 kHz, 11.88–12.47 kHz ve 14.73–15.68 kHz aralıklarında belirgin iletim kaybı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.8'deki simülasyon ve deneysel veriler genel olarak benzer bant aralıklarında zayıflama göstermekte ve bu durum yapının yasak frekans bantlarının (bant aralıkları) başarılı şekilde hem sayısal hem de deneysel olarak gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Bu bantlarda enerji, yapının içinde yayılmak yerine saçılarak sönmölenmektedir. Deneysel ölçümler de özellikle 3 kHz–5 kHz ve 10 kHz–12 kHz aralıklarında benzer zayıflamaları doğrular niteliktedir. Simülasyonlarda zayıflama miktarları 80–90 dB gibi yüksek değerlere ulaşabilirken, deneysel ölçümlerde bu değer maksimum 20–25 dB civarındadır.

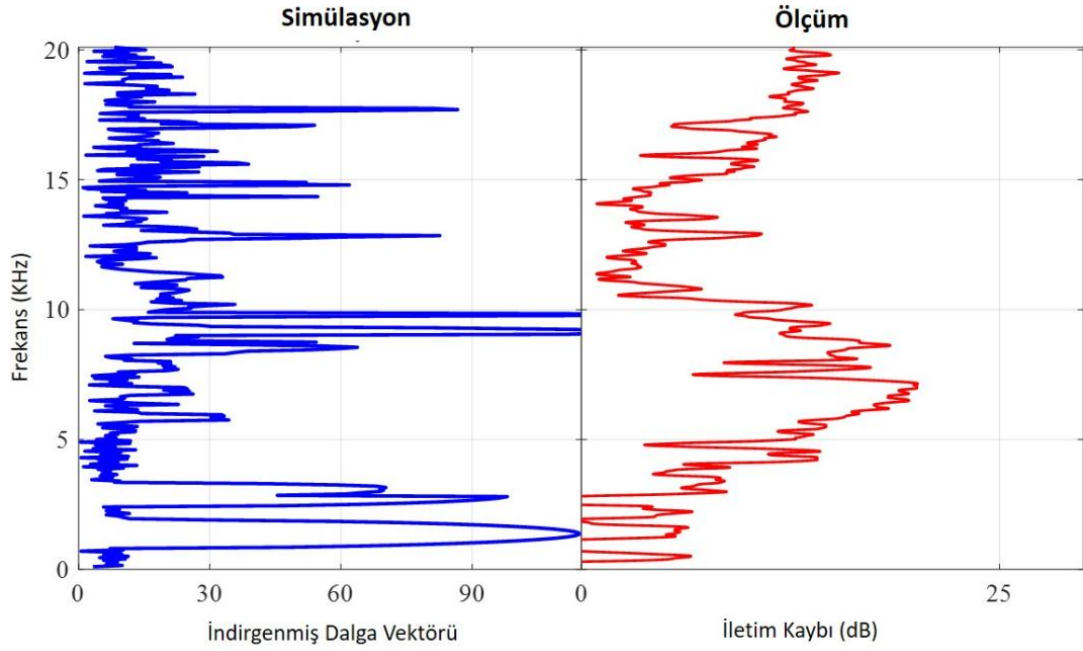
Bu yapı, kare örgü ile aynı boyutlarda olmasına rağmen, asimetric dizilim sebebiyle farklı akustik davranışlar sergilemektedir. $F-X$ ve $X-M$ yönlerinde farklı genişlikte yasaklı bölgeler oluşmuştur. Sesin geliş yönüne bağlı olarak farklı geçiş davranışları gözlemlenmiştir. Bu tasarım, belirli yönlerden gelen gürültülerin filtrelenmesi için (örneğin HVAC boru hatları, makine kabinleri) uygundur.



Şekil 4.9. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm $b_2= 120$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.5. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm $b_2= 120$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

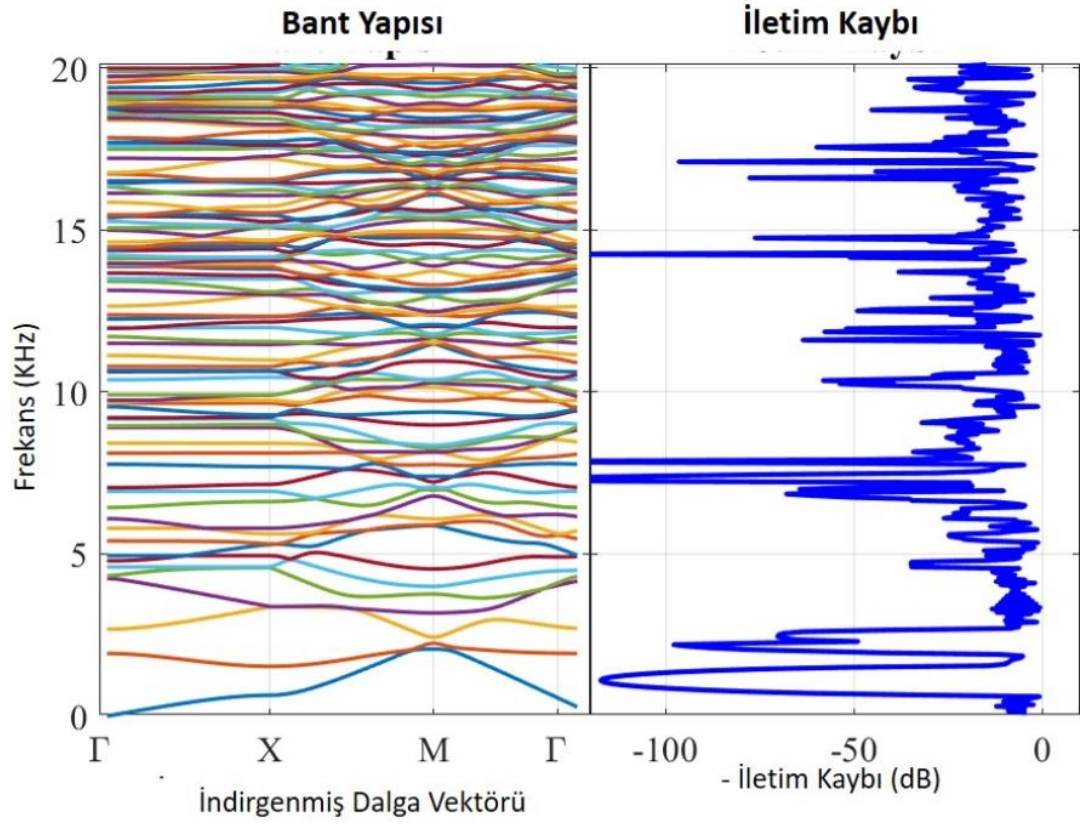
Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.93	0.21	7.10



Şekil 4.10. Örgü sabiti $a_2=60$ mm $b_2=120$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.9'daki simülasyon sonuçlarında yaklaşık 2.4–3.3 kHz, 3.9–4.5 kHz 7.6–8 kHz, 8.8–9.7 kHz, 12.37–13.27 kHz ve 18 kHz frekanslarında belirgin iletim kaybı gözlenirken, deneysel verilerde bu aralıklarda benzer fakat daha düşük genlikli iletim kaybı oluşmuştur (Şekil 4.10). Bu durum, yapının belirli frekanslarda sesin geçişine karşı etkin bir engel oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ancak yüksek frekanslarda (örneğin 20 kHz'e yakın bölgede), deneysel sonuçlar simülasyonlara kıyasla daha düşük iletim kaybı göstermektedir.

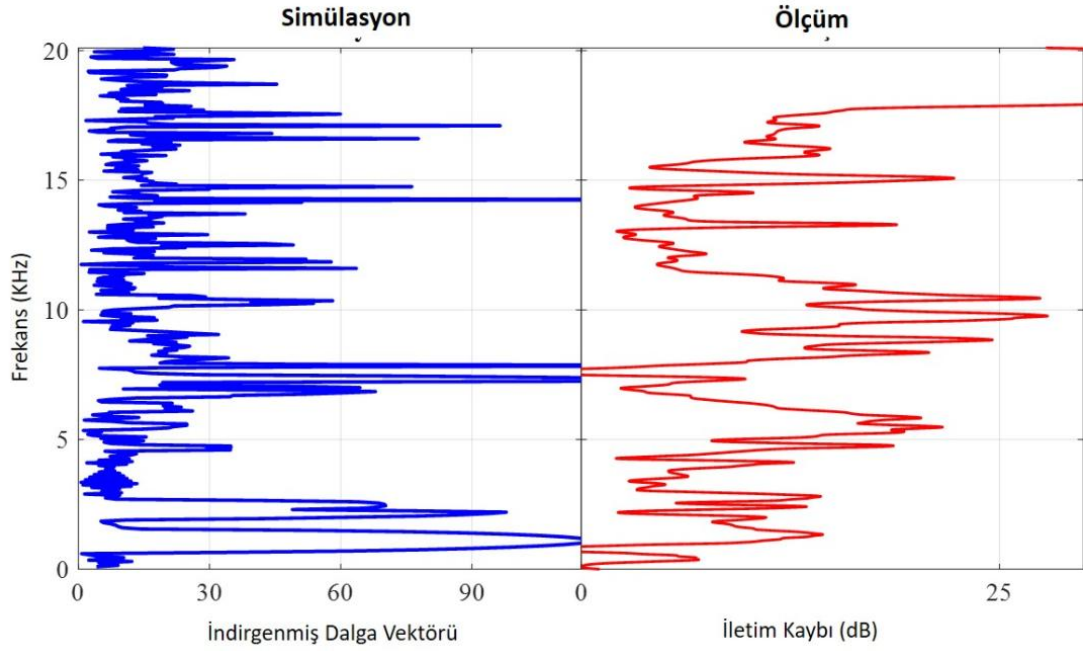
Asimetrik yapı, rezonansı genişletmiş, rezonans frekansı 2.93 kHz'e kaymıştır. Genişletilmiş bant yapısı sayesinde, bu yapı yönlü ve yarı-difüz gürültü kaynaklarını bastırmak için daha etkilidir.



Şekil 4.11. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.6. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.34	0.17	7.44

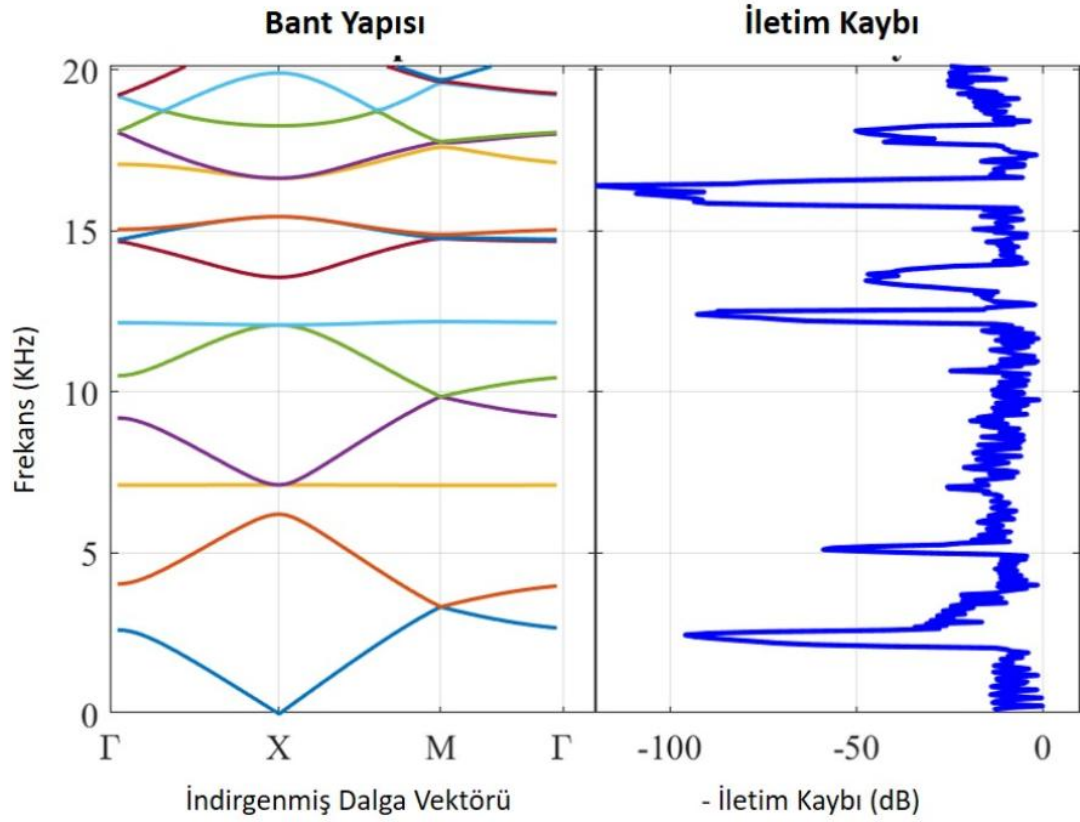


Şekil 4.12. Örgü sabiti $a=75$ mm $b=150$ mm ve yarıçapı $r=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Şekil 4.11'de ve Şekil 4.12'deki karşılaştırmalı simülasyon ve deneysel sonuçları, yapının yaklaşık 0.6–1.58 kHz, 1.93–2.68 kHz, 7.0–7.77 kHz, 8.4–8.9 kHz, 12.37–12.65 kHz ve 17.84–18.44 kHz civarında belirgin bant aralıklarında yüksek iletim kaybı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, fononik yapının bu frekanslarda sesi etkin bir şekilde bloke ettiğini ve bant aralıklarının başarılı bir şekilde oluştuğunu doğrulamaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–3.5 kHz, 4–7 kHz, 7.5–11 ve 15 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

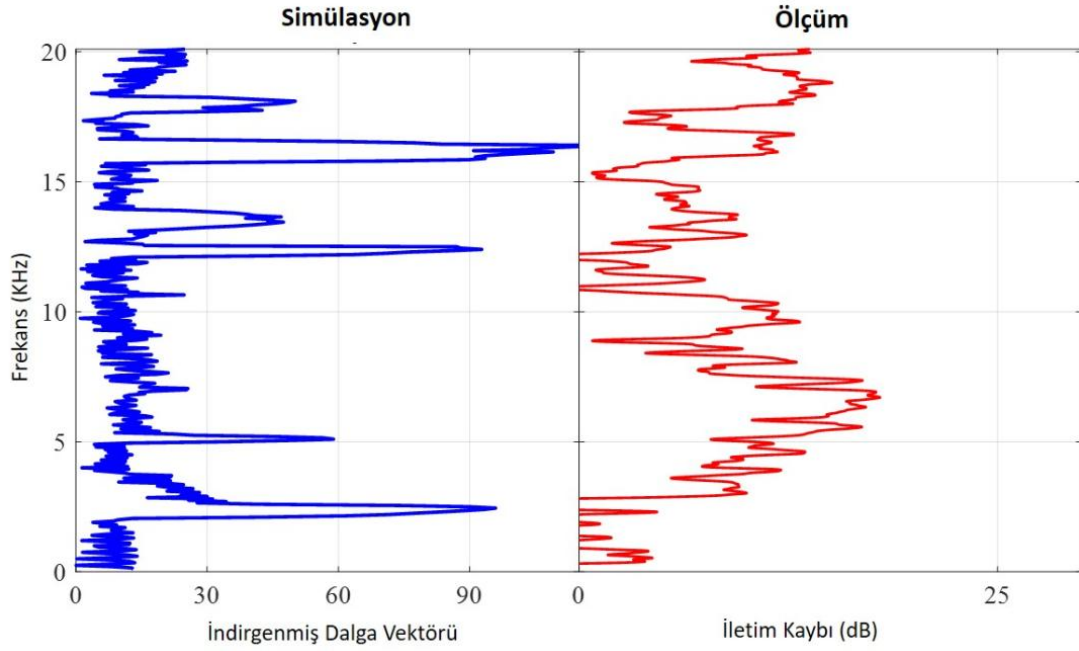
Bu yapı, dikdörtgen örgülerin en büyük boyutlandırılmış halidir. Boyutların büyümesiyle, yapının kütsel etkisi artmıştır. 2.34 kHz civarında 100 dB ile maksimum değerlere ulaşmıştır.



Şekil 4.13. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.7. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.32	0.00	0.04
Bant 2	6.65	0.90	13.53
Bant 3	12.86	1.38	10.72
Bant 4	16.03	1.18	7.38

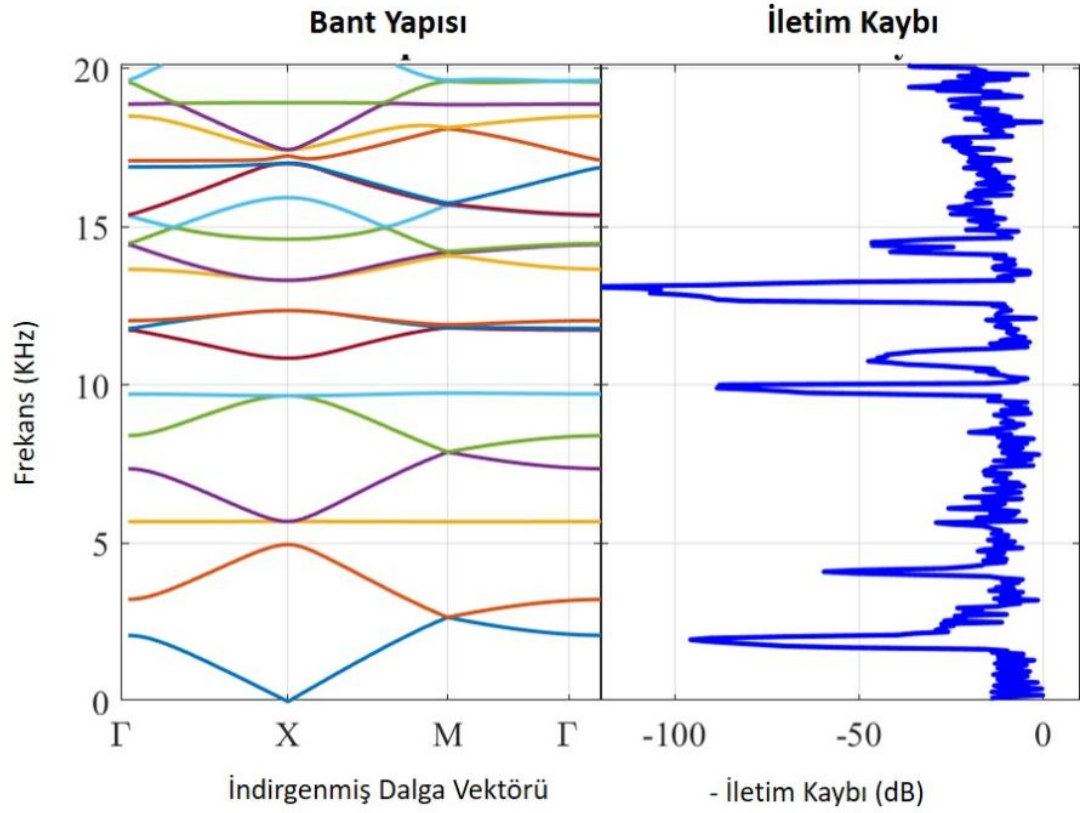


Şekil 4.14. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.14'deki üçgen örgülü fononik kristal yapının sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Simülasyon verilerinde yaklaşık 2.60–4.04 kHz, 9.17–10.49 kHz ve 15.93–17.05 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir (Şekil 4.13). Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.5 –7.5 kHz, 4–7 kHz, 8–11 ve 16–18 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralığı bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 15 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

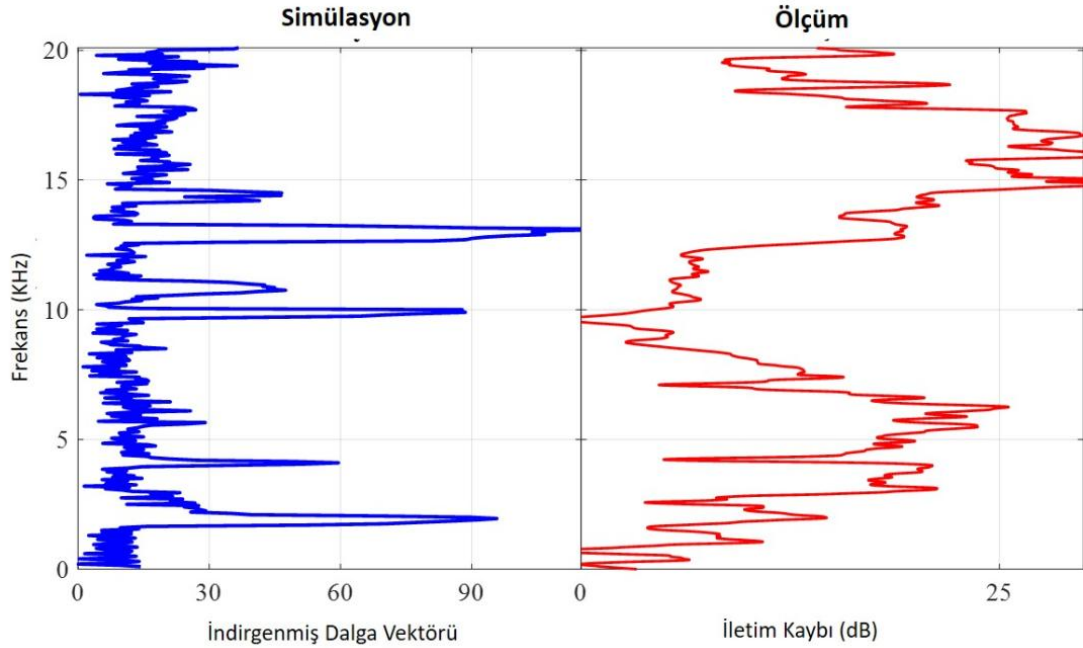
Üçgen örgüler, diğer dizilimlere kıyasla en yoğun paketlemeye sahiptir. Yoğun dizilim sayesinde, gelen ses dalgaları çok sayıda çubukla karşılaşarak daha yüksek kırılma ve yansıma yaşar. Üçgen simetri sayesinde, gelen sesin yönü ne olursa olsun benzer bir sönümleme sağlanır.



Şekil 4.15. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.8. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.66	0.00	0.04
Bant 2	5.32	0.72	13.54
Bant 3	10.29	1.10	10.73
Bant 4	12.82	0.95	7.37

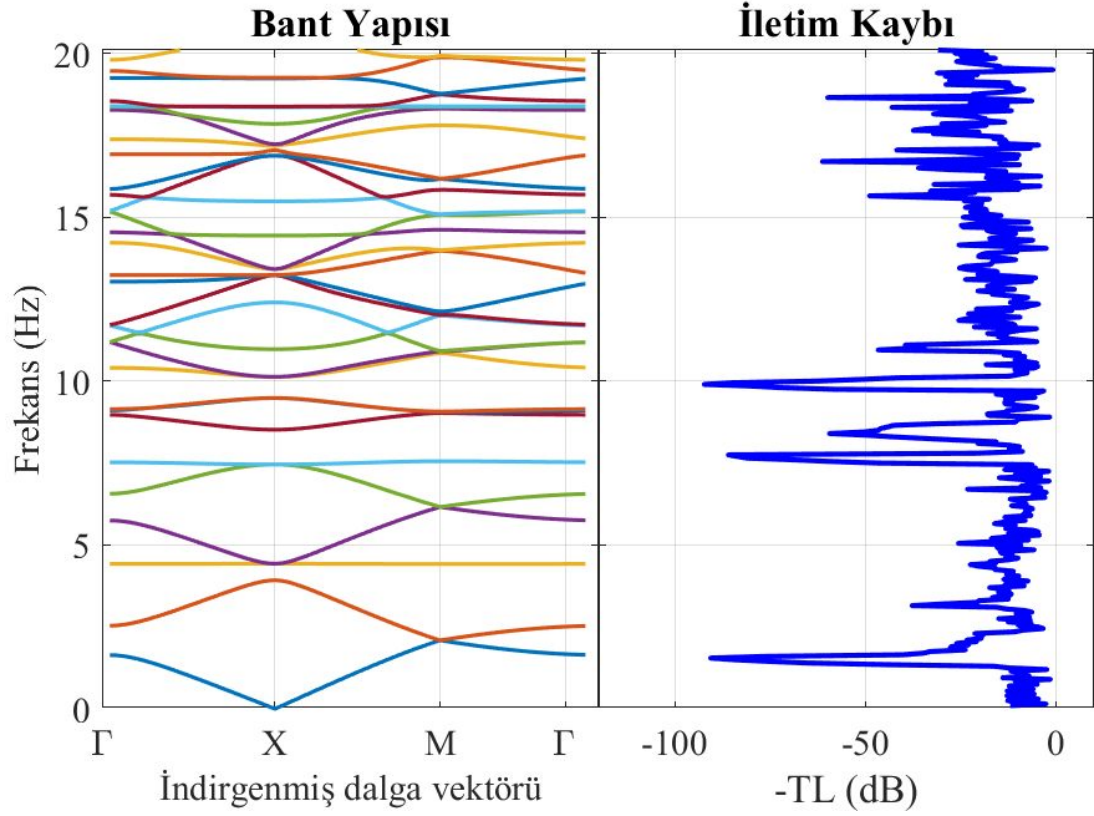


Şekil 4.16. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Simülasyon verilerinde yaklaşık 2.08–3.23 kHz, 3.23–5.68 kHz, 9.71–10.97 kHz ve 12.03–13.39 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir (Şekil 4.15). Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–7.5 kHz, 8–9 kHz, 12.5–15.5 kHz ve 16–18 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir (Şekil 4.16).

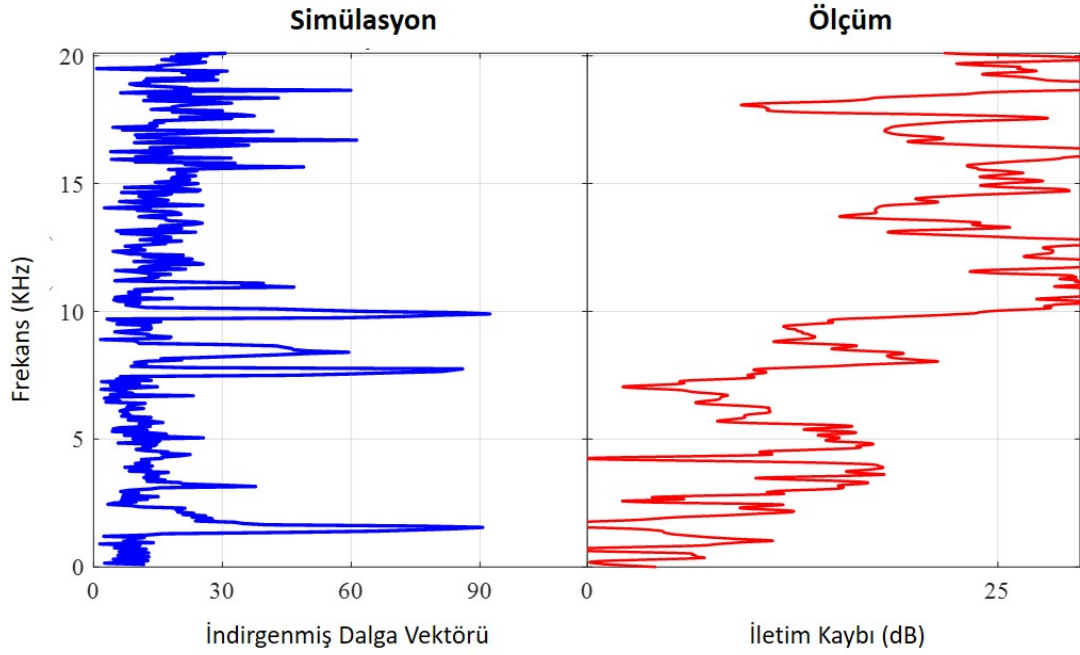
Yaklaşık 2.66 kHz civarında geniş ve simetrik bir bant aralığı (yasaklı bölge) gözlemlenmiştir. Yarıçapın artması, rezonans hacmini büyütmüş ve bu durum, yapının akustik performansını artırmıştır. Bu tasarımı; açık ofisler, büyük hacimli kapalı alanlar gibi sesin yönsüz olarak yayıldığı ortamlarda etkili bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 4.17. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.9. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.09	0.00	0.02
Bant 2	4.17	0.50	11.87
Bant 3	8.04	0.96	11.96
Bant 4	9.80	0.64	6.53

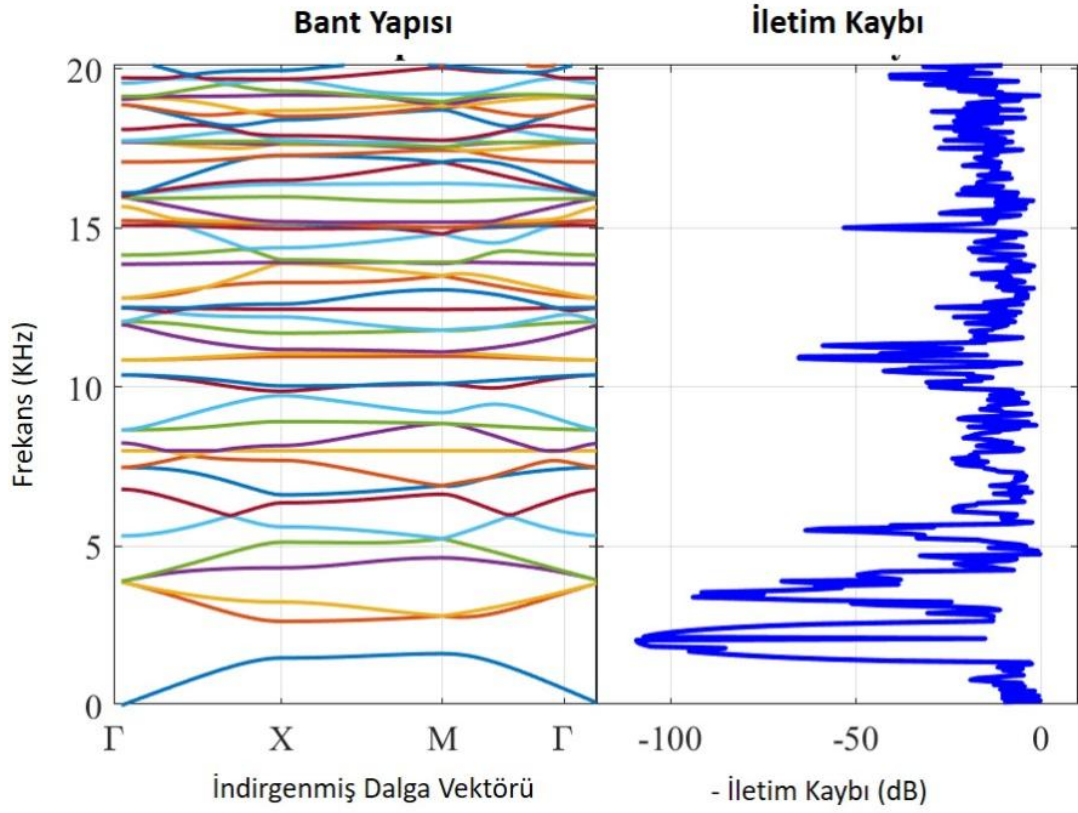


Şekil 4.18. Örgü sabiti $a_3=80$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.64–2.53 kHz, 7.52–8.58 kHz ve 9.42–10.22 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.17).

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 1–3.75 kHz, 4–6 kHz, 7.5–8.5 kHz, 9–13.5 kHz ve 17–18 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir (Şekil 4.18).

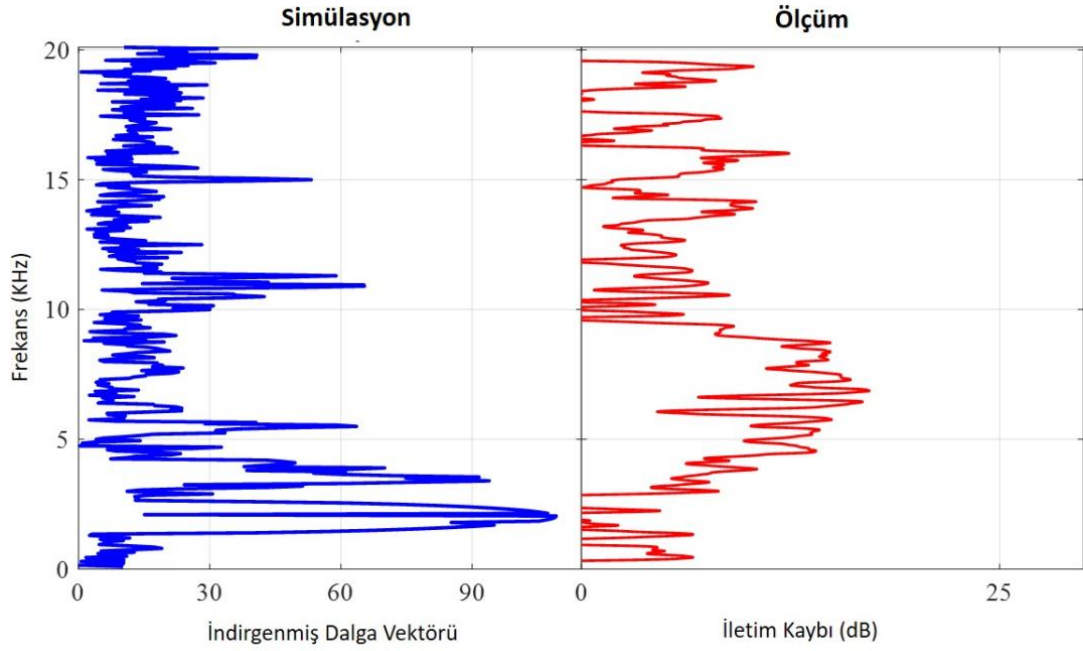
Bu yapı, tüm üçgen dizilimler arasında en yüksek performansı gösteren modeldir. İletim kaybı 2.09 kHz civasında 100 dB'ye ulaşır. Geniş frekans aralığında kararlı bant yapısı sunar. Bu tasarım, endüstriyel gürültü kontrolü, fabrika akustiği gibi ağır yük altında çalışan ortamlarda kullanılabilir.



Şekil 4.19. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.10. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.

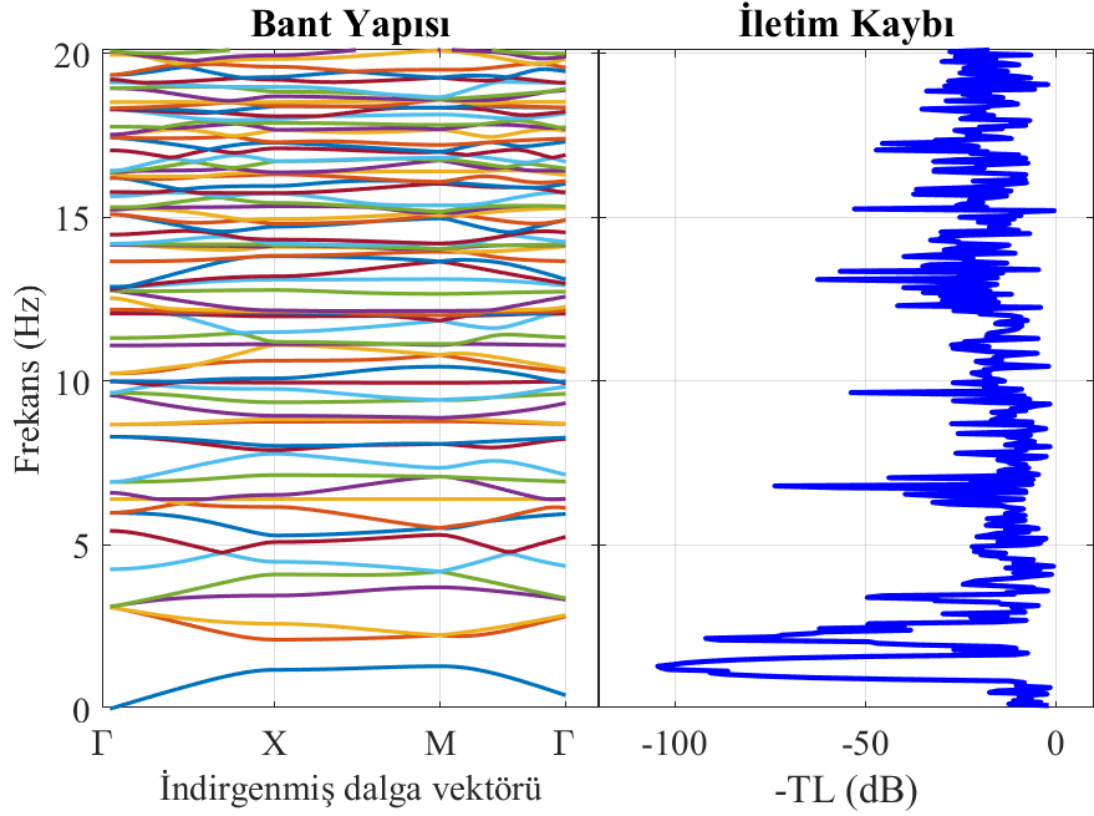
Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.13	1.01	47.56
Bant 2	5.95	0.01	0.14
Bant 3	9.80	0.14	1.38
Bant 4	10.61	0.47	4.41



Şekil 4.20. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.36–2.75 kHz, 3.93–5.32 kHz ve 10.37–10.84 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır (Şekil 4.19).

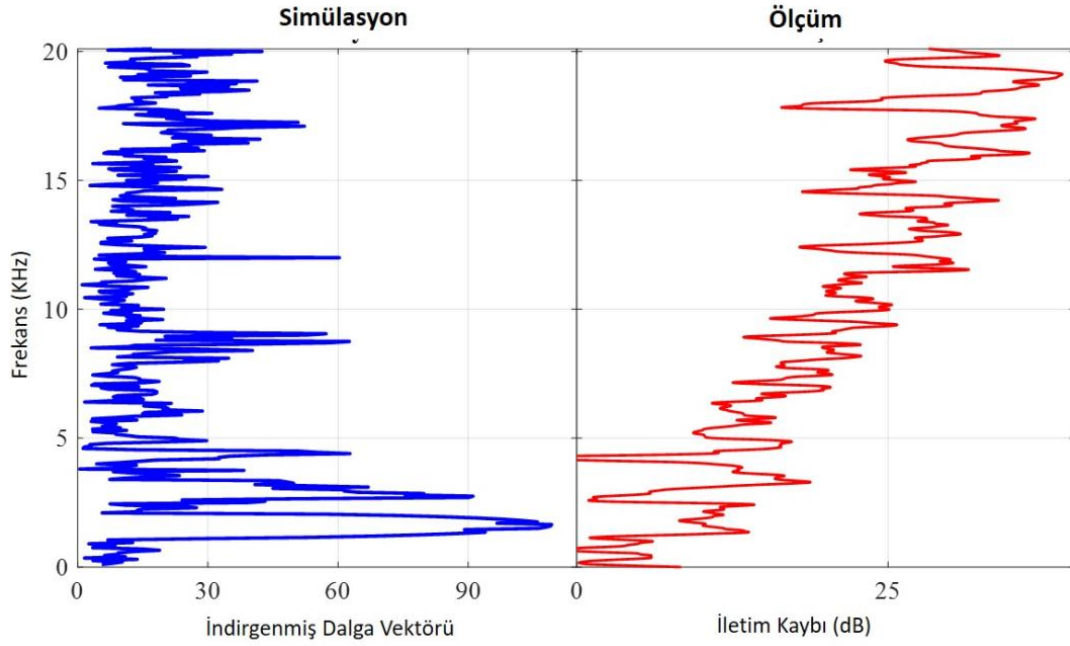
Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–3.75 kHz, 4–9 kHz, 10.5–14 kHz, 9–13.5 kHz ve 15–116.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 10 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.21. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.11. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.

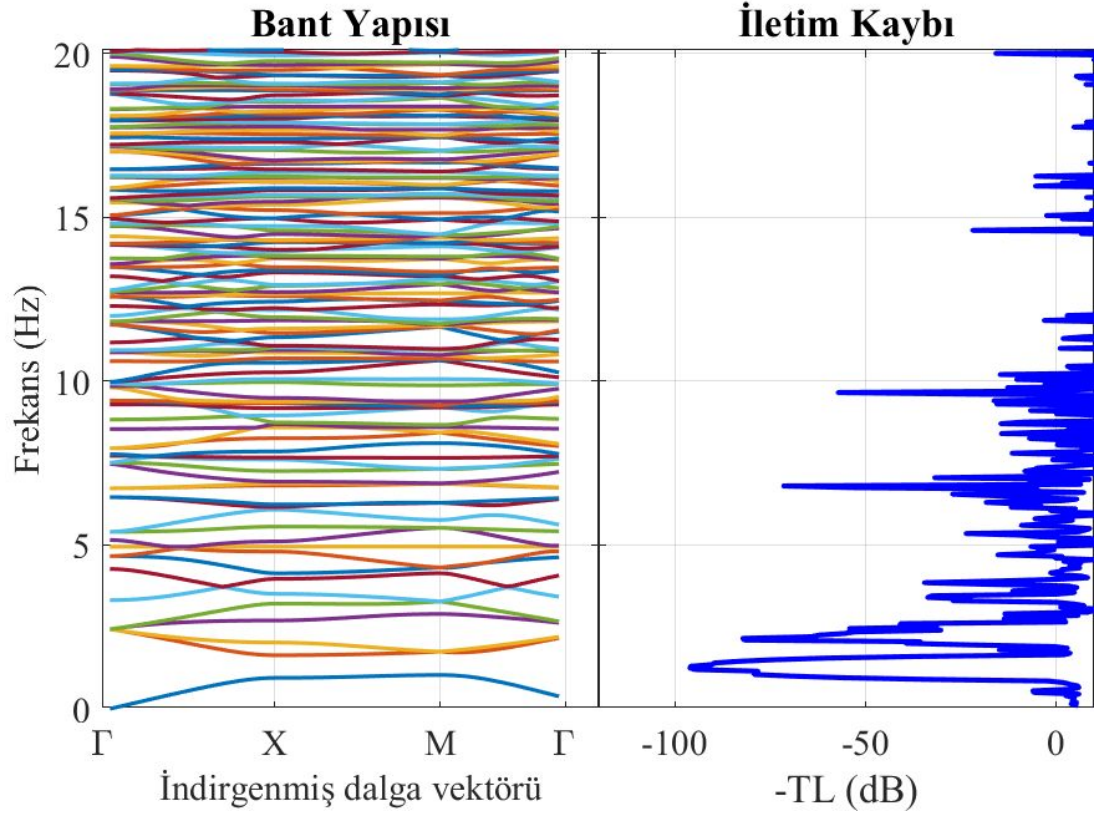
Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	1.71	0.81	47.56
Bant 2	4.76	0.01	0.14
Bant 3	7.84	0.11	1.38
Bant 4	8.49	0.37	4.40



Şekil 4.22. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.09–2.17 kHz, 3.15–4.26 kHz ve 8.30–8.67 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.21).

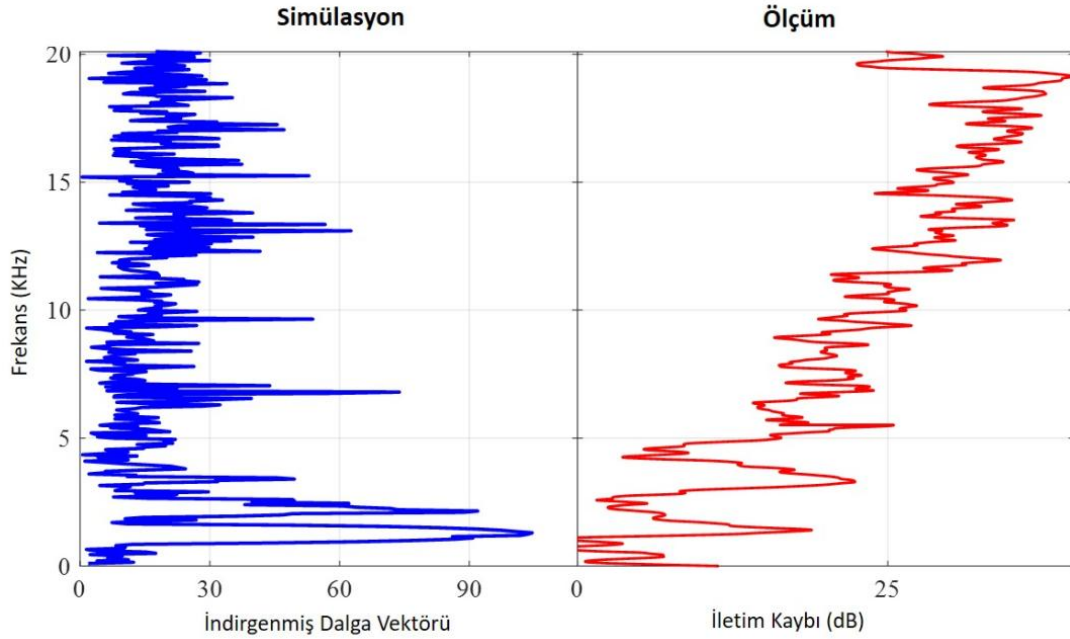
Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 1–2.75 kHz, 3.5–4.5 kHz, 5–10 kHz, 11.5–12.5 kHz, 12.75–13.75 kHz ve 15.5–18.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 15 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.23. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı.

Çizelge 4.12. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	1.33	0.60	45.21
Bant 2	2.43	0.00	0.13
Bant 3	6.12	0.08	1.32
Bant 4	6.59	0.27	4.14



Şekil 4.24. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi boş silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

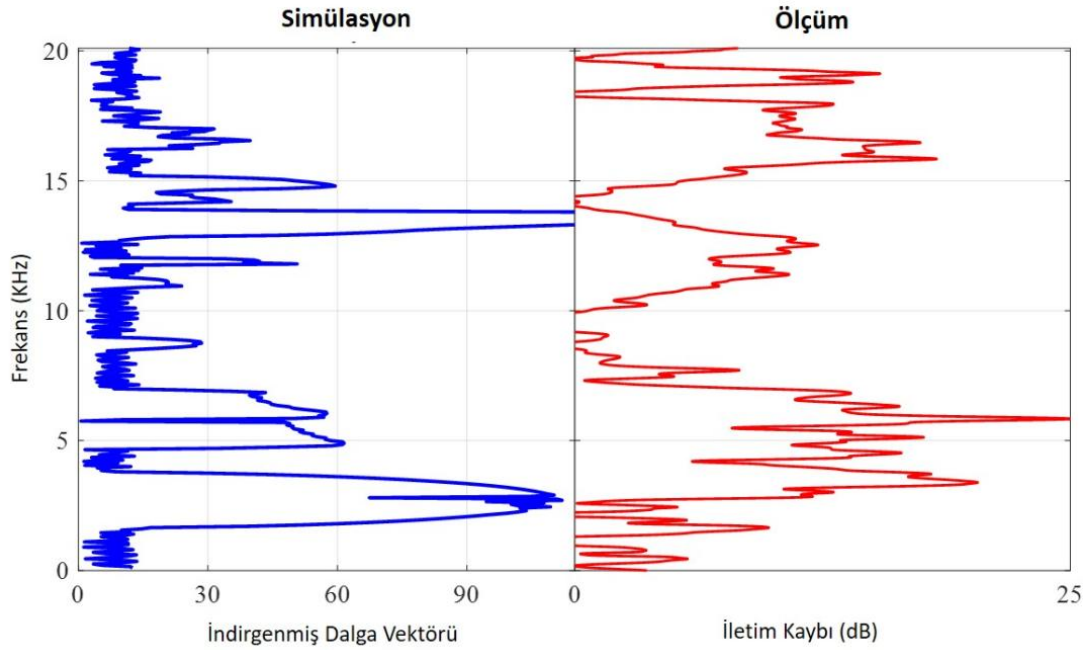
Simülasyon verilerinde yaklaşık 0.87–1.71 kHz, 2.46–3.83 kHz, 6.47–6.73 kHz ve 12.69–12.8 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır (Şekil 4.23).

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 1–1.5 kHz, 2.5–3.75 kHz, 5–6 kHz, 7–10 kHz, 11–13 kHz ve 13.25–14.75 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir. Bu farkın, deneysel sistemdeki sönüm, yapısal düzensizlikler ve çevresel etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.24).

Çalışmanın bu kısmından sonra aynı örgüye sahip yapılarıdaki boş silindirik çubukların içerisi su ile doldurularak simülasyon ve deneysel ölçümler tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.13. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.93	0.98	25.04
Bant 2	13.39	0.70	5.21
Bant 3	15.29	0.55	3.57
Bant 4	17.72	0.04	0.20



Şekil 4.25. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde iletim kaybı.

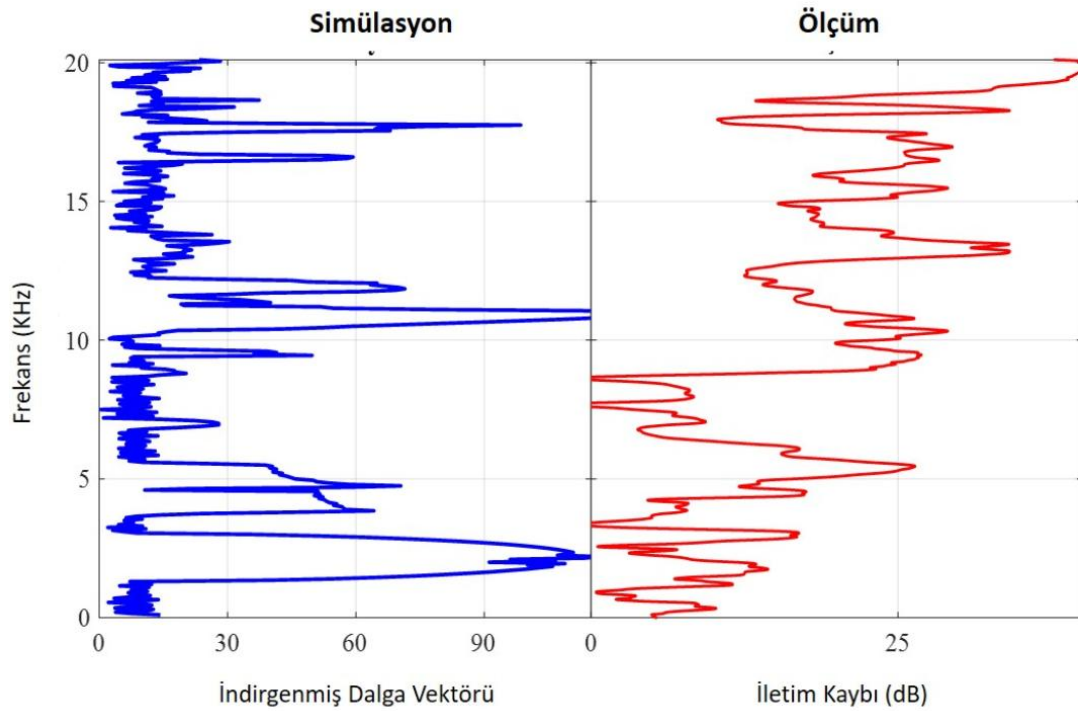
Şekil 4.25'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.87–4.6 kHz, 6.97–9.73 kHz, 13.02–13.99 kHz ve 16.63–18.08 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.5– 3.75 kHz, 4–5.5 kHz, 6–8 kHz, 9.75–11.5 kHz, 13–14 kHz ve 16.5–18.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu

görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 15 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.14. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.25	1.05	32.16
Bant 2	11.14	0.32	2.87
Bant 3	13.37	0.91	6.83
Bant 4	14.90	0.50	3.35



Şekil 4.26. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

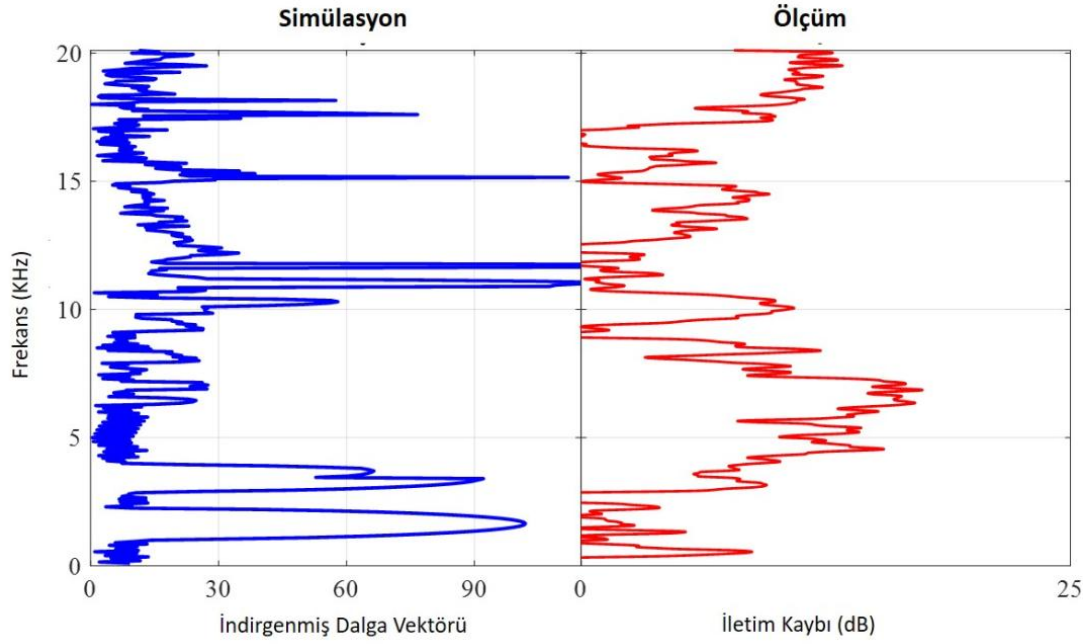
Şekil 4.26'da içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.55–3.91 kHz, 4.67–6.95 kHz, 10.97–11.32 kHz ve 12.75–14.07 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının

akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

DeneySEL ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–3.75 kHz, 3.75–5.5 kHz, 6–7.5 kHz, 12–14 kHz ve 15.5–16.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneySEL verilerde maksimum yaklaşık 15 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir. Şekil 4.26'da sunulan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu fononik kristal yapısının akustik iletim kaybı grafikleri, simülasyon ve deneySEL ölçüm sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Her iki eğri de yaklaşık 7–10 kHz ve 12–14 kHz frekans aralıklarında iletim kaybında artış göstererek, tasarlanan yapının bu bölgelerde akustik bant aralıkları oluşturma potansiyelini doğrulamaktadır.

Çizelge 4.15. Örgü sabiti $a_3=75$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.60	0.88	33.75
Bant 2	8.91	0.22	2.42
Bant 3	10.74	0.70	6.53
Bant 4	11.95	0.49	4.10



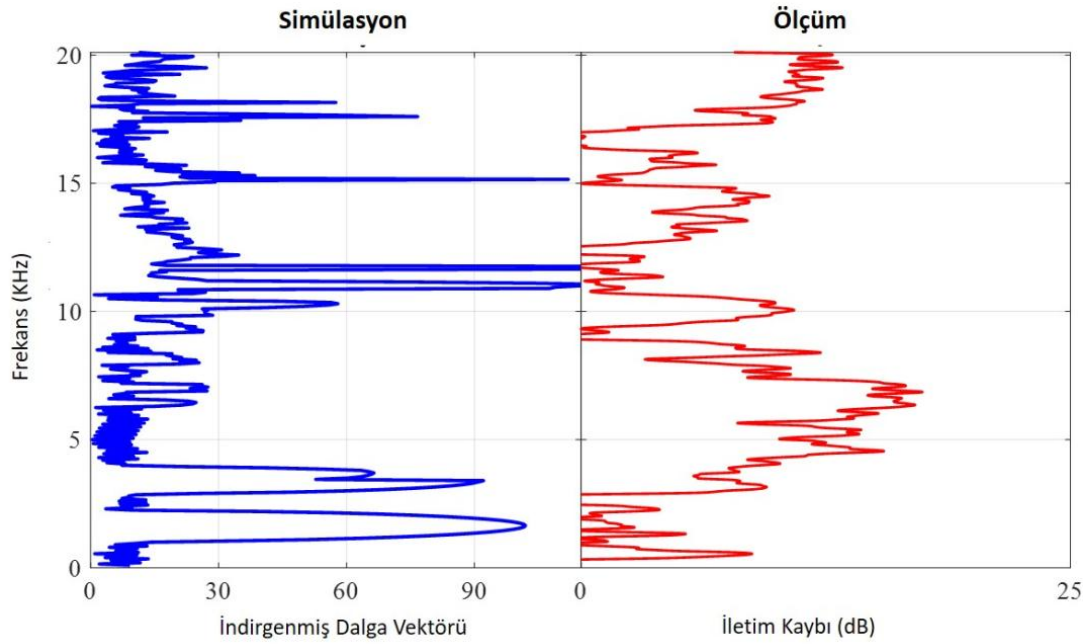
Şekil 4.27. Örgü sabiti $a_3 = 75$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.27'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan kare örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.20–3.14 kHz, 3.75–5.56 kHz, 10.26–11.29 kHz ve 17.37–17.8 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–2.75 kHz, 2.75–3.5 kHz, 4–6.5 kHz, 8–11 kHz ve 13–14 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.16. Örgü sabiti $a_1= 50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1= 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.54	0.20	5.53



Şekil 4.28. Örgü sabiti $a_1= 50$ mm $b_1=100$ mm ve yarıçapı $r_1= 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

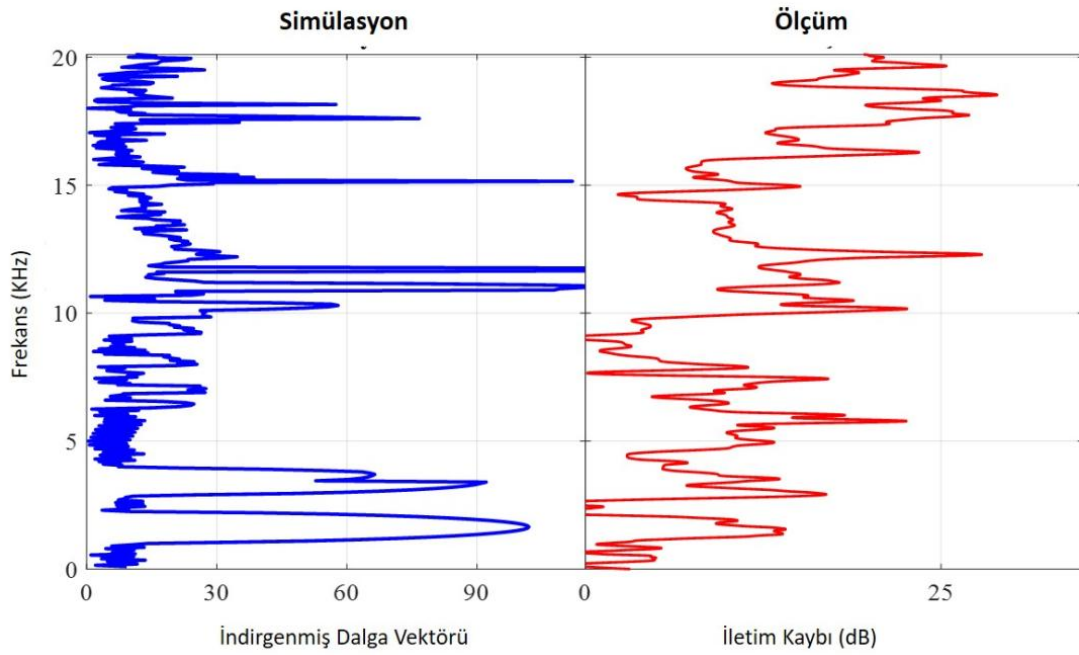
Şekil 4.28'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 0.93–2.32 kHz, 2.89–3.95 kHz, 10.63–11.48 kHz, 11.88–12.47 kHz ve 14.72–15.67 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.75– 5.5 kHz, 5.75–7.5 kHz, 9.5–10.5 kHz, 15.5–16.25 kHz ve 16.5–17.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 15 dB'lik zayıflama

gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.17. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm $b_2= 120$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.93	0.21	7.09



Şekil 4.29. Örgü sabiti $a_2= 60$ mm $b_2= 120$ mm ve yarıçapı $r_2= 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

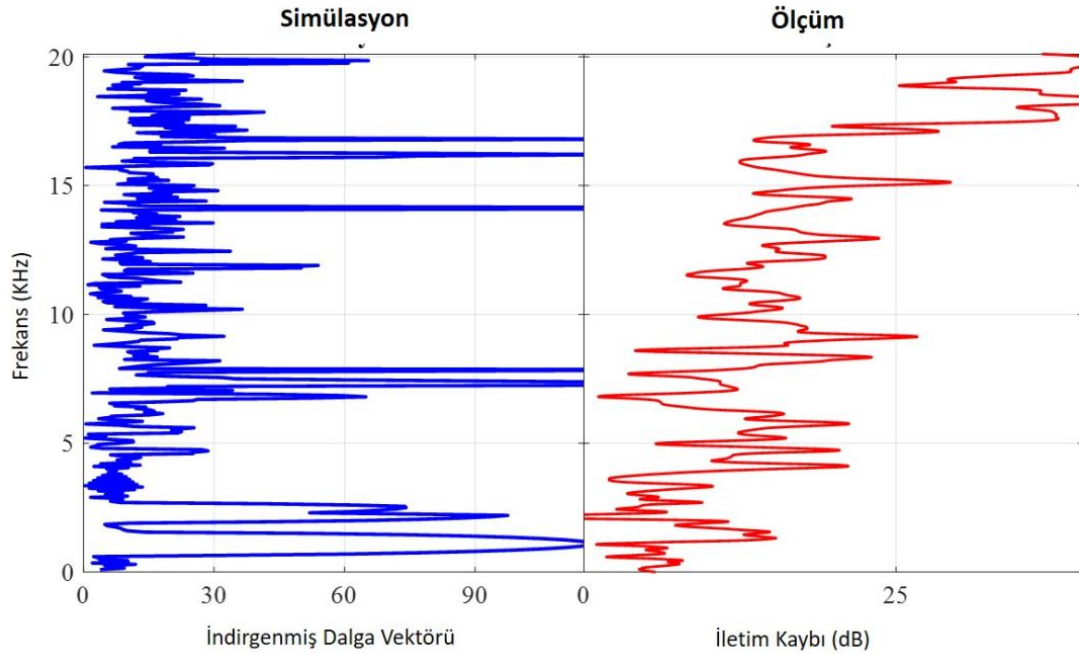
Şekil 4.29'da içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 0.74–1.97 kHz, 2.41–3.34 kHz, 8.9–9.62 kHz, 12.37–13.27 kHz ve 15.39–15.78 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.75– 5.5 kHz, 5.75–7.5 kHz, 9.5–10.5 kHz, 15.5–16.25 kHz ve 16.5–17.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin

yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 15 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.18. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.34	0.17	7.42



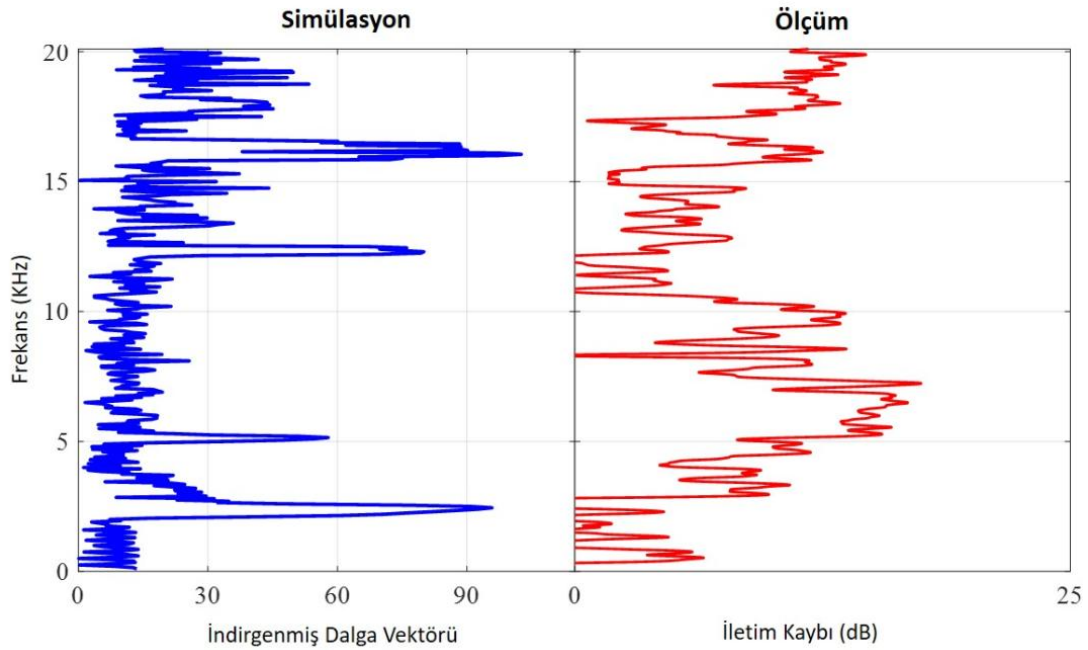
Şekil 4.30. Örgü sabiti $a_3=75$ mm $b_3=150$ mm ve yarıçapı $r_3=31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.30'da içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 0.58–1.58 kHz, 1.93–2.68 kHz, 6.08–6.43 kHz, 7.05–8.11 kHz, 12.64–13.5 kHz ve 15.46–15.85 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır.

Deneyssel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 1.5–2.5 kHz, 3.75–4.5 kHz, 5.1–6.5 kHz, 7.5–9 kHz, 13.5–14.5 kHz ve 15.5–17.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneyssel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.19. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	3.33	0.00	0.04
Bant 2	6.65	0.90	13.52
Bant 3	12.87	1.38	10.72
Bant 4	16.03	1.18	7.36



Şekil 4.31. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneyssel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

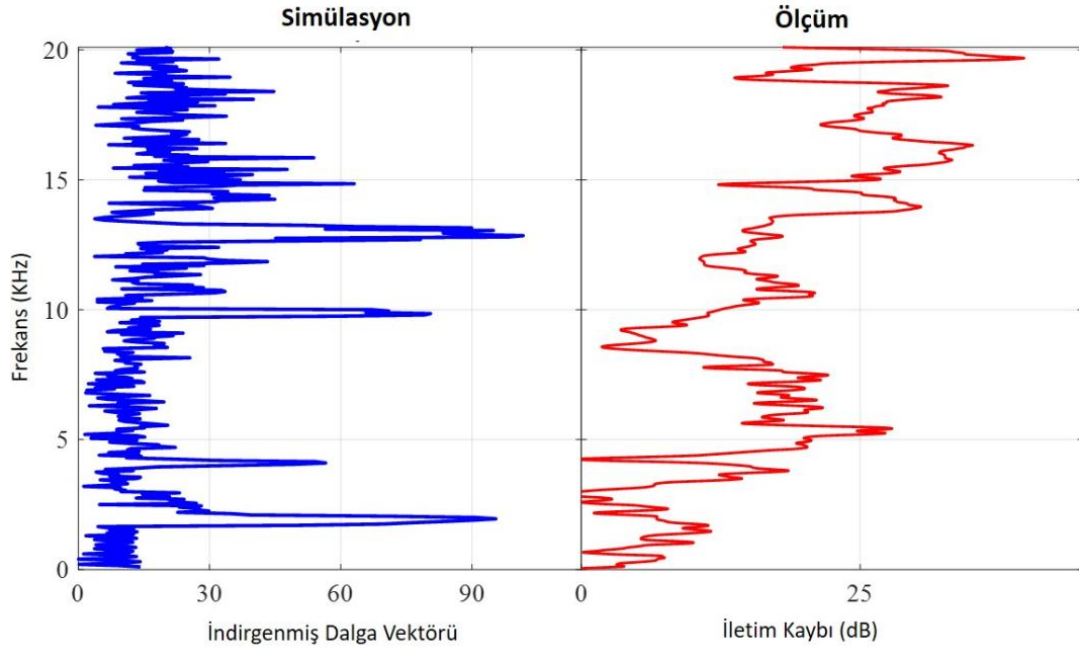
Şekil 4.31'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneyssel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir.

Simülasyon verilerinde yaklaşık 2.61–4.04 kHz, 5.79–7.11 kHz, 12.08–13.71 kHz ve 15.39–16.74 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

DeneySEL ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.5–3.75 kHz, 4–5 kHz, 5.1–6.5 kHz, 7.5–9 kHz, 9–11 kHz ve 15.5–16.5 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneySEL verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.20. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.72	0.01	0.31
Bant 2	5.48	1.03	18.72
Bant 3	10.71	0.82	7.64
Bant 4	16.81	0.50	2.98



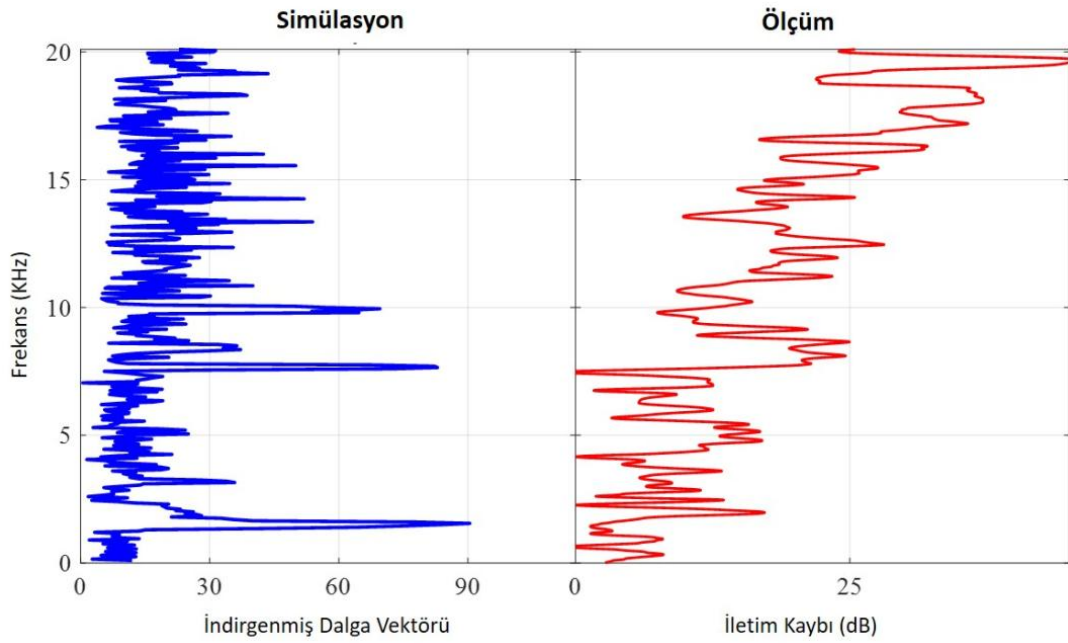
Şekil 4.32. Örgü sabiti $a_2 = 62.5$ mm ve yarıçapı $r_2 = 25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.32'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 2.13–3.29 kHz, 10.28–11.37 kHz ve 13.5–15.03 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2–3 kHz, 3.5–4.5 kHz, 4.75–5.5 kHz, 6–8.5 kHz, 9–12 kHz ve 14–14.75 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.21. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.09	0.00	0.01
Bant 2	4.17	0.49	11.85
Bant 3	8.04	0.96	11.95
Bant 4	9.80	0.64	6.51



Şekil 4.33. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

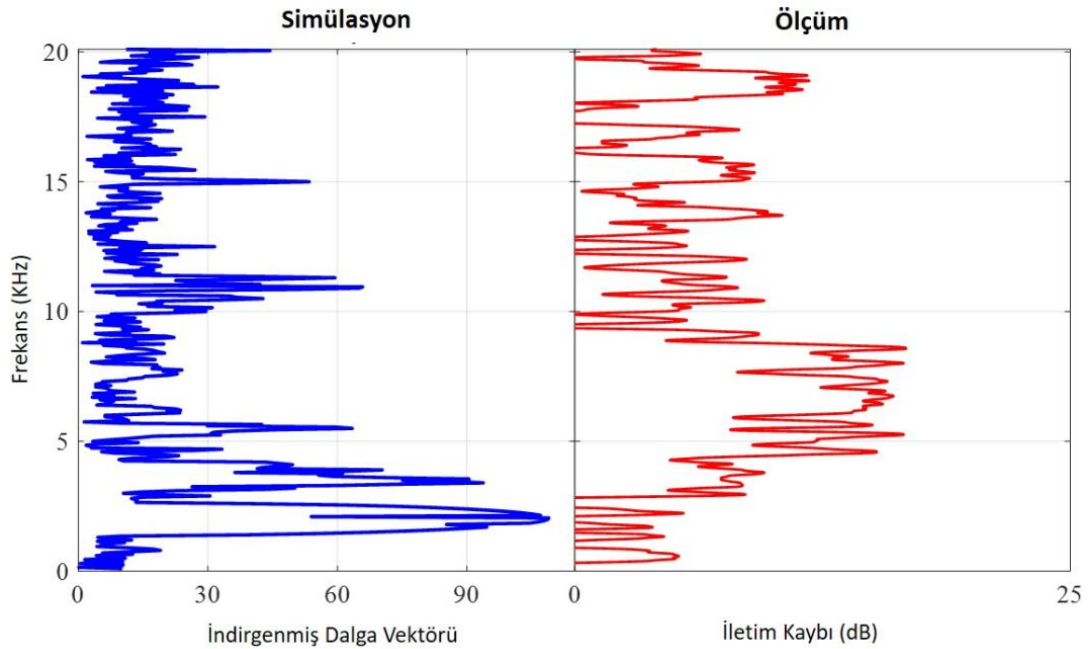
Şekil 4.33'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.64–2.54 kHz, 7.46–8.58 kHz ve 9.43–10.22 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 1.75–2.25 kHz, 4–5.5 kHz, 6.75–8 kHz, 11.75–13.75 kHz, 14–14.5 kHz ve 15.5–16 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı

kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.22. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	2.13	1.01	47.46
Bant 2	3.89	0.04	0.94
Bant 3	9.80	0.14	1.38
Bant 4	10.61	0.47	4.41



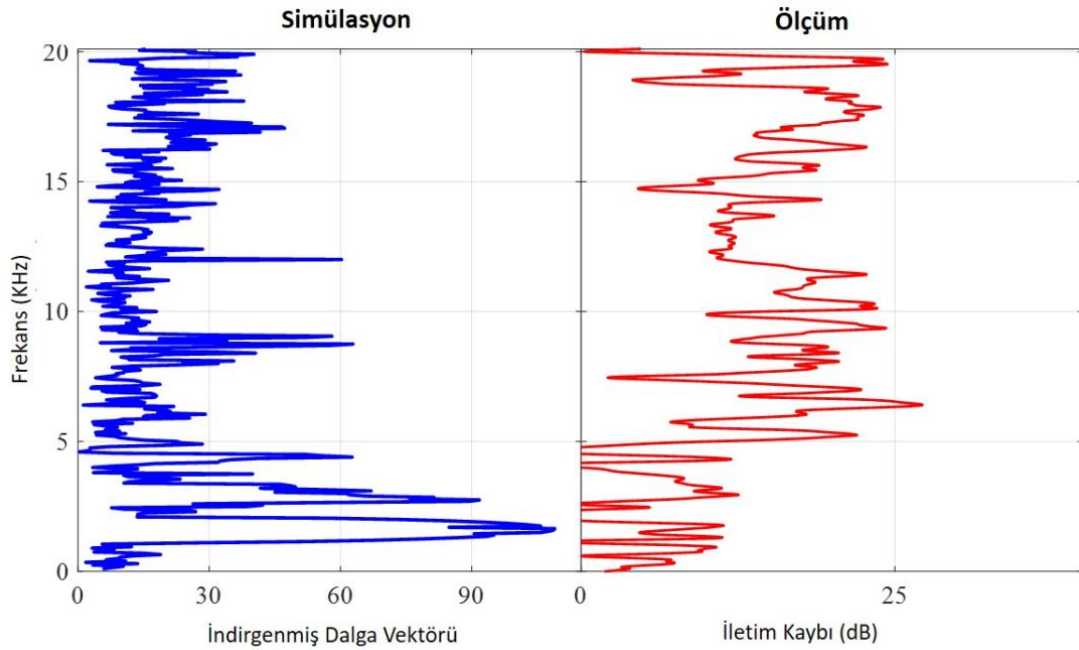
Şekil 4.34. Örgü sabiti $a_1 = 50$ mm ve yarıçapı $r_1 = 20$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.34'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan üçgen örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.41–2.72 kHz, 3.79–3.97 kHz ve 10.36–10.85 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlendiği anlaşılmaktadır.

Deneyssel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.75–4.5 kHz, 4.75–5.5 kHz, 6.75–8.75 kHz, 13–14 kHz, 15–16.25 kHz ve 17–19 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneyssel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.23. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	1.77	0.96	54.35
Bant 2	3.25	0.11	3.44
Bant 3	8.18	0.13	1.56
Bant 4	8.91	0.33	3.74



Şekil 4.35. Örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneyssel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

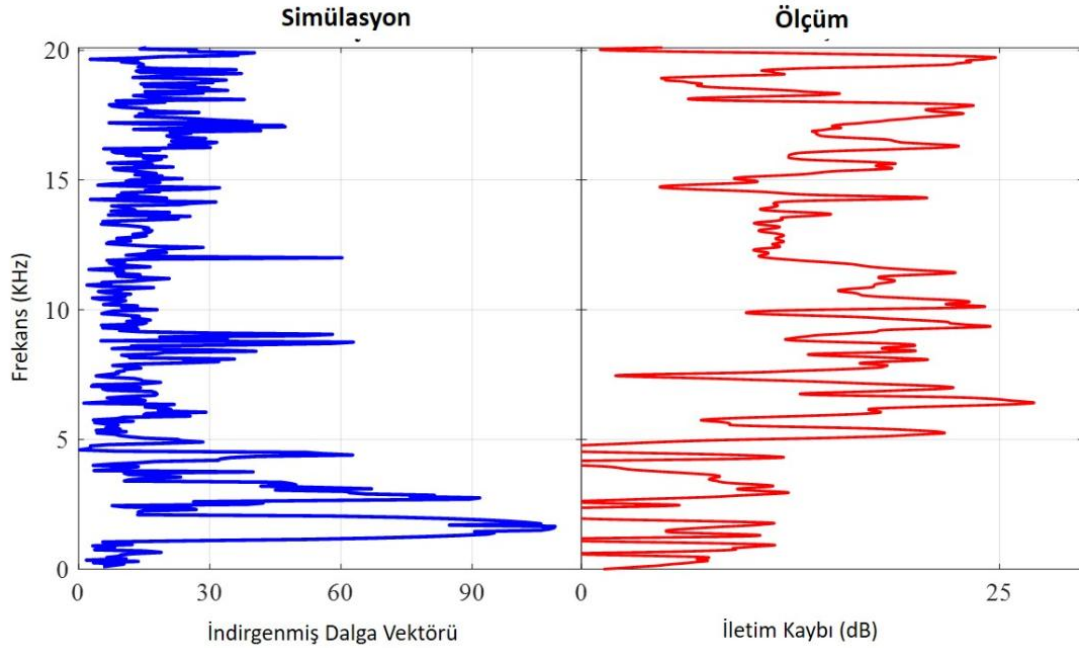
Şekil 4.35'de içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneyssel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir.

Simülasyon verilerinde yaklaşık 1.13–2.31 kHz, 3.16–3.34 kHz, 4.17–4.75 kHz ve 8.74–9.02 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneyisel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 2.75–4.5 kHz, 4.75–5.5 kHz, 6.75–8.75 kHz, 13–14 kHz, 15–16.25 kHz ve 17–19 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneyisel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.24. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü birim hücrenin bant yapısı.

Bantlar	Merkez Frekans (kHz)	Δf	$\Delta f/f_c$ (%)
Bant 1	1.34	0.60	45.10
Bant 2	2.43	0.00	0.15
Bant 3	6.12	0.08	1.32
Bant 4	6.59	0.27	4.15



Şekil 4.36. Örgü sabiti $a_3 = 80$ mm ve yarıçapı $r_3 = 31.5$ mm olan içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümlerinden elde edilen iletim kaybı.

Şekil 4.36'da içi su dolu silindirik çubuklardan oluşan bal peteği örgülü sonlu yapının simülasyon ve deneysel ölçümden elde iletim kayıpları görülmektedir. Simülasyon verilerinde yaklaşık 0.89–1.69 kHz, 2.37–2.49 kHz, 7.76–7.96 kHz ve 10.55–10.65 kHz aralıklarında belirgin bant aralık bölgeleri gözlenmektedir. Bu frekans aralıklarında iletim kaybı 60–90 dB seviyelerine ulaşmakta ve yapının akustik dalgaları önemli ölçüde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Deneysel ölçümlerde de benzer iletim kaybı bölgeleri gözlemlenmekte olup bu bölgeler sırasıyla 1–2.5 kHz, 3.75–4.65 kHz, 4.75–5.75 kHz, 6–7.25 kHz, 7.5–8.5 kHz ve 10.15–12.75 kHz olarak ölçülmüştür. Her iki yöntemde de bant aralık bölgelerinin yüksek frekanslarda genişlediği ve genlik açısından anlamlı kayıplar oluşturduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında iletim kaybı değeri 90 dB seviyelerine kadar çıkarken, deneysel verilerde maksimum yaklaşık 25 dB'lik zayıflama gözlemlenmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre Çizelge 4.1- 4.12 içi boş silindirik çubuklarda meydana gelen bant aralıklarını gösterirken Çizelge 4.13-4.24 aynı yapılarda içi su dolu silindirik çubuklarda meydana gelen bantları göstermektedir. Sonuçlara göre boş silindirlerle içi su dolu silindirlerde meydana gelen bant yapıları hemen hemen

aynıdır.

Düşük frekanslarda en geniş bant aralığı bal peteği örgüde gözlemlenmiştir; örneğin örgü sabiti $a_2=62.5$ mm ve yarıçapı $r_2=25$ mm olan içi su dolu bal peteği örgüde 1.77 kHz de $\Delta f/f_c$ (%)=54.35 olarak gözlemlenmiştir. Kare örgülerde ise düşük frekanslarda geniş bant oluşumları gözlemlenirken, daha yüksek frekanslarda da nispeten daha geniş bantlar oluşmuştur. Örneğin, Çizelge 4.3 'de görüldüğü gibi 2.6 kHz merkez frekansta $\Delta f/f_c$ (%)=33.81, 8.91 kHz de, $\Delta f/f_c$ (%)= 2.42, 10.74 kHz de $\Delta f/f_c$ (%)= 6.54, 11.95 kHz de $\Delta f/f_c$ (%)= 4.1 olarak gözlemlenmiştir.

Dikdörtgen örgüde önemli bir bant oluşumu oluşmazken 4-16 kHz aralığında $\Delta f/f_c$ (%)=7.36-18.72 olarak gözlemlenmiştir.

Bal peteği yapılar dalga yayılımını eş yönlü sınırlayan yapılardır. Gürültü engellenmenin yanında yapısal kararlılık ve görsel estetik de sunar. Bal peteği yapılar, doğal simetriye sahip oldukları için daha düzenli bant yapısı göstermektedir. Özellikle düşük frekanslarda performans düşüktür, ancak orta frekansta kararlıdır. Altıgen simetri sayesinde yönsel bağımlılığın azalması, geniş alanlı sönümleme sağlar. Bu yapı, hem bant genişliği hem de kayıp değeri açısından optimum performansa sahiptir. Doğal rezonans eğilimleri daha geniş frekanslara yayılmıştır.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, silindirik çubuklardan oluşan dört farklı örgü türünün (kare, dikdörtgen, üçgen ve bal peteği) çeşitli geometrik boyutlandırmalarla (örgü sabiti a ve çubuk yarıçapı r) oluşturduğu birim hücre yapılarına ait akustik bant yapısı ve frekansa bağlı iletim kaybı özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. COMSOL ve MATLAB tabanlı sayısal analizlerle elde edilen simülasyon sonuçları, hem yapı geometrisinin hem de malzeme düzeninin ses yalıtımı üzerinde ne kadar etkili olduğunu ortaya koymuştur.

5.1. Örgü Tipine Bağlı Performans Değişimi

Farklı örgü geometrilerine sahip fononik kristal yapılar, akustik bant aralığı özellikleri ve yönlülük davranışları açısından önemli farklılıklar sergilemektedir. Kare örgü yapılar, yüksek simetriye sahip olmaları sayesinde dar ve belirgin akustik bant aralıkları oluşturabilmektedir. Özellikle küçük boyutlu (örneğin $a_1=50\text{mm}$, $r_1=20\text{ mm}$) kare yapılar, yüksek frekanslarda ($\sim 900\text{ Hz}$) lokal rezonanslara bağlı olarak dar bir frekans aralığında etkili sönümleme sağlarken; boyutlar arttıkça bu rezonans bölgeleri daha düşük frekanslara kaymakta ve bant genişliği artmaktadır. Bu frekans seçici yapı, belirli bir gürültü kaynağının hedeflenerek bastırılması gereken durumlarda avantaj sağlarken, sınırlı bant genişliği nedeniyle geniş bantlı gürültü yalıtımı için yetersiz kalabilmektedir.

Dikdörtgen örgü yapılar, simetrik olmayan dizilimleri nedeniyle bant yapısında yönsel sapmalar göstermiştir. Simülasyon sonuçları, Γ -X ve X-M yönlerinde rezonans yoğunluğu ve bant aralıklarında farklılıkların oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu durum, dikdörtgen örgülerin sesin geliş yönüne bağlı olarak değişen anizotropik akustik performans sergilediğini göstermektedir. Bu özellik, özellikle tek doğrultudan gelen mekanik titreşimlerin veya kanal tipi yapı içindeki ses geçişlerinin engellenmesi gibi uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Üçgen örgü yapılar ise, geometrik olarak en sık paketlenmiş yapılar olduklarından, ses dalgalarıyla temas olasılığı daha yüksek olmakta ve dolayısıyla daha fazla yansıma ve kırılma yaşanmaktadır. Bu sık dizilim sayesinde hem düşük hem de yüksek frekanslarda daha geniş rezonans bölgeleri oluşmakta, buna bağlı olarak da kararlı, yönsüz ve geniş bir iletim kaybı eğrisi elde edilmektedir. Üçgen örgüler, çok yönlü gelen ses dalgalarına karşı homojen bir yalıtım sağladığı için özellikle kalabalık metro istasyonları veya fabrika sahaları gibi düzensiz ses kaynaklarının bulunduğu ortamlarda etkili bir performans göstermektedir.

Bal peteği (hexagonal) örgü yapılar, sahip oldukları altıgen simetri sayesinde hem yönsüz hem de geniş bantlı ses yalıtımı açısından üstün bir performans sergilemektedir. Bu yapılar, frekans spektrumunun geniş bir bölgesinde kararlı iletim kaybı sağlayarak; özellikle şok benzeri darbe tipi akustik dalgalar, endüstriyel gürültüler ve düşük frekanslı yayımlar gibi zorlu akustik koşullarda etkili bir çözüm sunmaktadır. Simülasyon verileri, bal peteği örgüsünün incelenen tüm örgü tipleri arasında en yüksek ses yalıtım performansına sahip olduğunu ortaya koymuştur

5.2. Boyut Parametrelerinin Etkisi

Çalışmada tüm örgü tipleri için ortak olarak gözlemlenen önemli bir bulgu, örgü sabiti a ve çubuk yarıçapı r gibi yapısal boyutların artırılmasıyla rezonans frekanslarının daha düşük frekanslara kayması ve buna paralel olarak iletim kaybı değerlerinin artmasıdır. Bu sonuçlar, akustik metamateryal yapıların temel olarak geometrik rezonansa dayalı bir mekanizmayla çalıştığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle büyük boyutlu yapılarda, yapı içindeki çubuk rezonansları ve çubuklar arası etkileşimler, düşük frekans aralıklarında daha baskın hale gelmektedir. Bu durum, ses dalgalarının iletimini azaltan enerji tuzaklama, faz hızı yavaşlaması ve dalga yayılımının sınırlandırılması gibi fiziksel etkileri tetiklemektedir. Yapı boyutlarının artırılması aynı zamanda daha geniş yasaklı bant aralıklarının oluşmasını da sağlamaktadır. Geniş bant yapıları sayesinde, yalnızca belirli rezonanslara değil, daha geniş frekans aralıklarında etkili olan genel bir ses yalıtımı sağlanabilir.

Nitekim yapılan simülasyonlarda, örgü sabiti $a_3=80$ mm olan sistemlerde iletim kaybı değerlerinin 75–90 dB aralığına kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyumun, bu büyük yapılarda %50'den %60'a yükselmiş olması, modelin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini desteklemektedir. Bu da daha büyük yapısal tasarımların özellikle düşük frekanslı gürültülerin bastırılmasında etkili olduğunu göstermektedir. Ancak yapısal boyutların artırılması, beraberinde sistemin hacmini ve ağırlığını da artıracığından, yer kısıtlaması olan uygulamalarda bu durum sınırlayıcı bir unsur olabilir.

5.3. Sıvı Dolgunun Etkisi

İçi su dolu çubuklardan oluşan yapılar, ilave olarak şu etkileri göstermiştir: Simülasyonda beklenen iletim kaybı ile deneysel ölçümler arasında % 40 – % 60 düzeyinde genlik farkı oluşmuştur. Bu fark, sıvı ve katı yapıların ara yüzey etkileşimlerinin daha hassas modellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

5.4. Uygulama Açısından Değerlendirme

Elde edilen sonuçlar, akustik metamateriyallerin ses yalıtımında kullanım potansiyelini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Yüksek frekanslı, dar bantlı gürültüler için küçük boyutlu kare ve üçgen örgüler yeterli olabilir. Düşük frekanslı, geniş bantlı gürültüler için bal peteği ve üçgen yapılar öne çıkmaktadır. Yönlü gürültülerin bastırılması gereken alanlarda dikdörtgen dizilimler hedef odaklı çözüm sunabilir. Özellikle metamateryallerin geleneksel yalıtım malzemelerine göre çok daha hafif, daha ince ve özelleştirilebilir olmaları, ses yalıtımı alanında yeni nesil çözümler geliştirilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı örgü tiplerinde (kare, dikdörtgen, üçgen ve bal peteği) ve çeşitli geometrik boyutlandırmalarda (örgü sabiti a ve yarıçap r) tasarlanan silindirik çubuklardan oluşan metamateryal yapıların akustik bant yapıları ve frekansa bağlı iletim kayıpları sayısal analizler yoluyla değerlendirilmiştir. COMSOL ve MATLAB ortamlarında gerçekleştirilen simülasyonlar aracılığıyla, her bir yapının ses yalıtımına olan katkısı hem örgü dizilim tipi hem de boyutsal parametreler açısından detaylı olarak incelenmiştir.

6. SONUÇLAR

6.1. Örgü Türü ve Geometrik Parametrelerin Etkileri

Çalışmanın temel bulgusu, örgü türünün ses yalıtım performansını doğrudan belirlediğidir. Kare örgüler yüksek frekanslarda etkili yalıtım sağlarken, üçgen örgüler yönsüz ve dengeli bir performans sergilemiştir. Bal peteği örgüler ise en geniş yasaklı bant aralığı ve en yüksek iletim kaybı (simülasyonda ≈ 90 dB) ile öne çıkmış; geniş bantlı, yüksek performanslı ve yönsüz yalıtım sağlaması nedeniyle en etkili metamateryale konfigürasyonu olarak belirlenmiştir. Geometrik boyutların artması, yasaklı bantların düşük frekanslara kaymasına ve iletim kaybının artmasına yol açmıştır. Büyük ölçekli yapılar ($a \approx 73-80$ mm) düşük frekanslı (≤ 1.5 kHz) seslerin kontrolünde, küçük boyutlu yapılar ise yüksek frekanslarda daha başarılı olmuştur. Orta frekans aralığında (10-13 kHz) ise $a \approx 60$ mm örgü sabiti optimum dengeyi sağlamıştır.

6.2. Simülasyon-Deneysel Uyum ve Sapma Nedenleri

Simülasyon sonuçları, parametrik bağımlılıklar ve temel akustik davranışlar açısından deneysel bulgularla nitel olarak uyum göstermiştir. Ancak, simülasyonların öngördüğü yüksek iletim kaybı değerleri (≈ 90 dB), deneysel ölçümlerdeki maksimum 25 dB kayıptan belirgin şekilde yüksektir. Bu farklılık; malzeme sönümlemesinin modelde yetersiz temsili, üretim toleransları, bağlama koşullarındaki ideal olmayan durumlar, mikrofon/hoparlör konumlandırma hataları ve ortam yansımaları gibi faktörlerle açıklanmaktadır. Yüksek frekanslarda (> 2.5 kHz) gözlenen performans düşüşü ve deneysel eğrilerin "gürültülü" yapısı, bu sınırlamaları desteklemektedir. Sapmaların azaltılması için sönümleme parametrelerinin gerçekçi modellenmesi, ses kaçak yollarının minimize edilmesi ve ileri malzeme karakterizasyon tekniklerinin kullanılması önerilmektedir.

6.3. Uygulama Önerileri ve Bilimsel Çıkarımlar

Bal peteği örgülü yapılar, özellikle metro, havaalanı ve santral gibi geniş bantlı/düşük frekanslı gürültünün kontrol edilmesi gereken alanlar için ideal çözümler sunar. Yüksek iletim kaybı gerektiren uygulamalarda $a \approx 80$ mm örgü sabiti tercih edilmelidir. Performans optimizasyonu için sıvı viskozitesinin ayarlanması (gliserin-su karışımları) ve yüksek frekanslarda etkinliği artırmak amacıyla gradiyent indeksli tasarımların araştırılması kritik öneme sahiptir. Ölçek büyüdükçe mutlak performans artmakta, ancak yüksek frekans sınırlamaları belirginleşmektedir. Bu durum, fononik kristal tasarımında ölçek-geometri-performans ilişkisinin sistematik

anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır.

6.4. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Bu çalışma, bal peteği örgülü fononik kristallerin 1.5-16 kHz frekans aralığında etkili ses yalıtımı sağladığını ve pratik uygulamalarda kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Örgü tipinin yasaklı bant konumunu belirlemedeki kritik rolü, ölçek artışının deneysel zorluklara rağmen düşük frekans performansını iyileştirmesi ve sıvı-katı etkileşimlerinin rezonans davranışını şekillendirmesi temel bilimsel çıkarımlardır. Gelecek çalışmalarda, termoakustik etkileşimlerin modellenmesi ve geometrik parametre optimizasyonu ile performansın daha da iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

7. ÖNERİLER

Bu çalışma çerçevesinde elde edilen bulgulara dayanarak aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

Uygulamaya Yönelik Öneriler: Gürültü kontrolü gerektiren mühendislik uygulamalarında (örneğin, bina içi yalıtım, otomotiv sektörü, endüstriyel makine kabinleri), örgü tipi ve boyutlandırması hedeflenen frekans aralığına göre optimize edilmelidir. Bal peteği dizilimli büyük boyutlu yapılar, düşük frekanslı ve yönsüz gürültülerin azaltılması gereken metro, havalimanı, fabrika gibi ortamlarda kullanılmalıdır. Kare ve dikdörtgen örgü yapılar, frekans seçici uygulamalarda (örneğin hassas cihaz odaları, akustik sensör çevrelemesi) işlevsel olabilir.

Bilimsel ve Akademik Öneriler: Gelecek çalışmalarda, farklı malzeme türleriyle (ör. kompozitler, esnek polimerler) oluşturulan örgü yapıların ses yalıtım performansı karşılaştırılmalıdır. Bu çalışmada yalnızca düzlemsel ses dalgaları analiz edilmiş olup, çok yönlü veya dairesel kaynaklı dalgalarla yapılan 3D analizler ile değerlendirme derinleştirilebilir. Yalnızca ideal koşullar altında yapılan bu simülasyonların, deneysel verilerle desteklenmesi, metamalzeme tasarımlarının doğruluğunu artıracaktır.

Yapısal Tasarım Önerileri: Geometrik olarak optimize edilmiş, hibrit örgü yapıları (ör. iç içe geçmiş kare ve üçgen örgüler) ile hem frekans kapsamı artırılabilir hem de fiziksel dayanım korunabilir. Akustik metamateryallerin yalnızca ses yalıtımı değil, titreşim kontrolü, dalga yönlendirme ve enerji odaklama gibi uygulamalarda da kullanımı değerlendirilmelidir.

Gelecek çalışmalar için öneriler: Malzeme viskozitesinin kontrollü şekilde değiştirilmesi (örneğin su-gliserin karışımları), çubuk duvar kalınlığının $t/r \approx 0.15-0.20$ aralığında optimize edilmesi, gradyan indeksli tasarımlar ile yüksek frekanstaki performansın iyileştirilmesi, daha hassas deney sistemleri ve sensör teknolojileriyle deneysel sapmaların azaltılması önerilir. Endüstriyel uygulamalar için $a \approx 60-80$ mm aralığında üçgen örgülü tasarımlar önerilir, ancak sıvı dolumlu sistemlerde sönümleme kontrolü zorunludur.

KAYNAKLAR

- Anufriev, R., Maire, J., & Nomura, M. (2021). Review of coherent phonon and heat transport control in one-dimensional phononic crystals at nanoscale. *APL Materials*, 9(7), 070701.
- Aravantinos-Zafiris, N., Kanistras, N., & Sigalas, M. M. (2021). Acoustoelastic phononic metamaterial for isolation of sound and vibrations. *Journal of Applied Physics*, 129(10), 104903.
- Atasever, G. (2019). *İki boyutlu katı/katı fononik kristallerde elastik band yapıları* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- Buss, R. (1972). United Nations Conference on the Human Environment (UNCHE). In *Proceedings of the Stockholm Conference, Stockholm, Sweden, 5–16 June*.
- Chaikin, P. M., & Lubensky, T. C. (1995). *Principles of condensed matter physics*. Cambridge University Press.
- Chaunsali, R., Li, F., & Yang, J. (2016). Stress wave isolation by purely mechanical topological phononic crystals. *Scientific Reports*, 6, 30662.
- Demir, M. (2023). İçi boş silindirlere oluşan farklı örgü yapılarına sahip fononik kristallerin bant yapılarının incelenmesi. *Dicle University Journal of Engineering*, 14(3), 401–405.
- Demirci, F., Oltulu, O., Palaz, S., Mamedov, A. M., & Özbay, E. (2020). Band gap structure of a ferroelectric LiNbO₃ based 2D-phononic crystal. In *IENSC 2020 - 5th International Engineering and Natural Sciences Conference* (ss. 443–444).
- Deymier, P. A. (2013). *Acoustic metamaterials and phononic crystals*. Springer.
- Djafari-Rouhani, B., Pennec, Y., Vasseur, J., Hladky-Hennion, A.-C., & Larabi, H. (2009). Phononic crystals and manipulation of sound. *Physica Status Solidi C*, 6(9), 2080–2085.
- Elford, D. P. (2010). *Band gap formation in acoustically resonant phononic crystals* (Doktora tezi, Loughborough University).
- García-Vidal, F. J., Martín-Moreno, L., & Pendry, J. B. (2005). Surfaces with holes in them: New plasmonic metamaterials. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7, S97–S101.
- Goffaux, C., & Sanchez-Dehesa, J. (2003). Two-dimensional phononic crystals studied using a variational method: Application to lattices of locally resonant materials. *Physical Review B*, 67, 144301.
- Goffaux, C., & Vigneron, J. P. (2001). Theoretical study of a tunable phononic band gap system. *Physical Review B*, 64, 075118.
- Güner, Ç. (2000). Gürültünün sağlık üzerine etkileri. *Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 9(7), 1–4.
- He, C., Zhao, H., Wei, R., & Wu, B. (2010). Existence of complete band gaps in 2D steel-water phononic crystal with square lattice. *Frontiers of Mechanical*

- Engineering in China*, 5(4), 450–454.
- Hu, G., Tang, L., Liang, J., Lan, C., & Das, R. (2021). Acoustic-elastic metamaterials and phononic crystals for energy harvesting: A review. *Smart Materials and Structures*, 30(8), 085025.
- Hughes, T. J. R. (2000). *The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis*. Dover Publications.
- Hussein, M. I., Hamza, K., Hulbert, G. M., & Saitou, K. (2007). Optimal synthesis of 2D phononic crystals for broadband frequency isolation. *Waves in Random and Complex Media*, 17(4), 491–510.
- Ibáñez, C., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & García-Raffi, L. M. (2012). Acoustic barriers based on fractal geometries. *Signal Processing*, 92(6), 1715–1720.
- Ibáñez, C., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & García-Raffi, L. M. (2010). Optimization of the acoustic properties of a two-dimensional multiperforated panel based on fractal geometries. *Journal of Sound and Vibration*, 329(20), 4205–4215.
- Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic crystals: Molding the flow of light* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Kabir, M., Mostavi, A., & Ozevin, D. (2018). Noise isolation with phononic crystals to enhance fatigue crack growth detection using acoustic emission. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 529–542.
- Kafesaki, M., Sigalas, M. M., & Economou, E. N. (1995). Elastic wave band gaps in 3-D periodic polymer matrix composites. *Solid State Communications*, 96(5), 285–289.
- Khelif, A., Hsiao, F. L., Choujaa, A., Benchabane, S., & Laude, V. (2010). Octave omnidirectional band gap in a three-dimensional phononic crystal. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57(7), 1621–1625.
- Kittel, C. (2005). *Introduction to solid state physics* (8th ed.). Wiley.
- Kunin, V., Yang, S., Cho, Y., Deymier, P., & Srolovitz, D. J. (2016). Static and dynamic elastic properties of fractal-cut materials. *Extreme Mechanics Letters*, 6, 103–114.
- Kuo, N. K., & Piazza, G. (2010). Evidence of acoustic wave focusing in a microscale 630 MHz aluminum nitride phononic crystal wave guide. In *2010 IEEE International Frequency Control Symposium* (ss. 530–533).
- Kushwaha, M. S., & Halevi, P. (1996). Giant acoustic stop bands in two-dimensional periodic arrays of liquid cylinders. *Applied Physics Letters*, 69(1), 31–33.
- Kushwaha, M. S., Halevi, P., Dobrzynski, L., & Djafari-Rouhani, B. (1993). Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, 71, 2022–2025.

- Li, J., & Chan, C. T. (2004). Double-negative acoustic metamaterial. *Physical Review E*, 70(5), 055602.
- Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T., & Sheng, P. (2000). Locally resonant sonic materials. *Science*, 289(5485), 1734–1736.
- Maksimović, M., & Jakšić, Z. (2005). Modification of thermal radiation by periodical structures containing negative refractive index metamaterials. *Physics Letters A*, 342, 497–503.
- Mir, F., Mandal, D., & Banerjee, S. (2023). Materials for acoustic noise filtering and energy harvesting. *Sensors*, 23(9), 4227.
- Mousanezhad, D., Babaei, S., Ghosh, R., Mahdi, E., Bertoldi, K., & Vaziri, A. (2015). Honeycomb phononic crystals with self-similar hierarchy. *Physical Review B*, 92, 104304.
- Norris, R. C., Hamela, J. S., & Nadeau, P. (2008). Phononic band gap crystals with periodic fractal inclusions: Theoretical study using numerical analysis. *Journal of Applied Physics*, 103, 104908.
- Olsson, R. H., & El-Kady, I. F. (2008). Microfabricated phononic crystal devices and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 145–146, 87–93.
- Oltulu, O., Şimşek, Ş., Mamedov, A. M., & Özbay, E. (2016). Phononic band gap and wave propagation on polyvinylidene fluoride based acoustic metamaterials. *Cogent Physics*, 3(1), 1169570.
- Özer, Z., Palaz, S., Mamedov, A. M., & Özbay, E. (2020). Band structure and transmission spectra in multiferroic based Sierpinski-carpet phononic crystal. *European Physical Journal Applied Physics*, 90(2), 1–6.
- Özgen, Ö. (2010). *Demiryolu gürültüsü ve etkili önlemlerin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- Palaz, S. (2020). Wave propagation on a ferroelectric liquid crystal based acoustic metamaterial. *Ferroelectrics*, 557(1), 66–72.
- Pennec, Y., Djafari-Rouhani, B., Larabi, H., Vasseur, J., & Hladky-Hennion, A.-C. (2009). Phononic crystals and manipulation of sound. *Physica Status Solidi C*, 6(9), 2080–2085.
- Psarobas, I. E., Stefanou, N., & Modinos, A. (2000). Scattering of elastic waves by periodic arrays of spherical bodies. *Physical Review B*, 62, 278–287.
- Sigalas, M., & Economou, E. N. (1993). Band structure of elastic waves in two-dimensional systems. *Solid State Communications*, 86(3), 141–143.
- Sigalas, M. M. (1998). Defect states of acoustic waves in a two-dimensional lattice of solid cylinders. *Journal of Applied Physics*, 84, 3026–3030.
- Sigalas, M. M., & Economou, E. N. (1992). Elastic and acoustic-wave band-structure. *Journal of Sound and Vibration*, 158(2), 377–382.
- Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and

- negative refractive index. *Science*, 305(5685), 788–792.
- Song, G. Y., Huang, B., Yuan, D. H. Y., Cheng, Q., & Cui, T. J. (2016). Broadband focusing acoustic lens based on fractal metamaterials. *Scientific Reports*, 6, 35929.
- Sukhovich, A., Merheb, B., Muralidharan, K., Vasseur, J. O., Pennec, Y., Deymier, P. A., & Page, J. H. (2009). Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals. *Physical Review Letters*, 102(15), 154301.
- Tanaka, Y., & Tamura, S.-I. (1998). Surface acoustic waves in two-dimensional periodic elastic structures. *Physical Review B*, 58, 7958–7964.
- Vasileiadis, T., Varghese, J., Babačić, V., Gomis-Bresco, J., Navarro Urrios, D., & Graczykowski, B. (2021). Progress and perspectives on phononic crystals. *Journal of Applied Physics*, 129(16), 160901.
- Vasseur, J. O., Djafarzadeh, S., Djafarzadeh, M., Deymier, P. A., Chenni, B., Hladky-Hennion, A.-C., Pennec, Y., & Laude, V. (2001). Experimental and theoretical evidence for phononic band gaps in two-dimensional crystals. *Physical Review Letters*, 86, 3012–3015.
- Walter Jensen, J. R., Duke, N. S., & Edward, M. M. (1975). Noise Pollution and Abatement Act of 1972. In *New Efforts Towards a Quieter Environment* (Vol. 13, ss. 45–46). Wiley.
- Yan, Z.-Z., Zhang, C., & Wang, Y.-S. (2013). Elastic wave localization in layered phononic crystals with fractal superlattices. *Journal of Vibration and Acoustics*, 135(4), 041004.
- Yang, W. J., Hu, T. T., Liang, X., & Shen, S. P. (2017). On band structures of layered phononic crystals with flexoelectricity. *Applied Mechanics and Materials*, 88, 629–644.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Ziman, J. M. (1972). *Principles of the theory of solids* (2nd ed.). Cambridge University Press.

EKLER

EK 1

Deneyisel Ölçüm Algoritması (Pseudocode)

1. Başla
2. Parametreleri tanımla:
 - Örneklem frekansı (Fs)
 - Sinyal süresi (duration)
 - Başlangıç ve bitiş frekansları (f_start, f_end)
 - Fade-in / fade-out süreleri
 - Frekans analiz sınırları (f_min, f_max)
3. Doğrusal chirp sinyali oluştur:
 - t zaman vektörü oluştur
 - chirp(t, f_start, duration, f_end) fonksiyonu ile sinyali üret
 - Fade-in ve fade-out işlemlerini uygula
4. Sinyali çalma ve ilk ölçüm (PnC ön yüzeyi):
 - Mikrofon başlat (audiorecorder)
 - Sinyali çal (audioplayer)
 - Sinyal süresince kaydet
 - Kaydı durdur ve veriyi al (audio1)
5. Kullanıcıdan ikinci ölçüm için hazır onayı al
6. İkinci ölçüm (PnC arka yüzeyi):
 - Mikrofon başlat
 - Sinyali çal
 - Sinyal süresince kaydet
 - Kaydı durdur ve veriyi al (audio2)
7. FFT işlemi uygula:
 - FFT boyutunu belirle (nextpow2)
 - audio1 ve audio2 için FFT hesapla
 - Genlik spektrumlarını elde et
8. Spektral düzgünleştirme uygula:
 - Y1 ve Y2 için abs değeri al
 - smooth fonksiyonu ile yumuşatma uygula
 - Normalize et
9. Zayıflama hesabı yap:
 - $\text{attenuation_dB} = 20 * \log_{10}(|Y1| / |Y2|)$
 - Smoothing uygula
10. Grafik oluştur ve kaydet:
 - Zaman domeni grafikleri
 - Frekans domeni (amplitude ve dB)
 - Zayıflama grafiği
11. Grafik ve verileri .tif, .fig ve .mat formatında kaydet
12. Bitir

Deneyisel Ölçüm Algoritması (Pseudocode)