T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKANİK PROGRAMI

GÜRÜLTÜYÜ AZALTAN VE PİEZOELEKTRİK ETKİ İLE ENERJİ HASAT EDEN HELMHOLTZ REZONATÖRÜ TASARIMI VE ANALİZİ

Ali ÖZERMİŞ

Danışman
Doç. Dr. Gözde SARI

MANİSA-2024

Ali ÖZERMİŞ	**GÜRÜLTÜYÜ AZALTAN VE PİEZOELEKTRİK ETKİ İLE ENERJİ HASAT EDEN HELMHOLTZ REZONATÖRÜ TASARIMI VE ANALİZİ**	**2024**

Tez Sırtı

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Ali ÖZERMİŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ali ÖZERMİŞ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gözde SARI

Enerji hasadı üzerine yapılan çalışmalar son zamanlarda büyük bir ilgi uyandırmaktadır. Bu çalışmalar, atık enerjilerin faydalı enerjiye dönüştürülmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Akustik enerji geri dönüştürülebilme potansiyeline sahip enerji türlerinden biridir. Ses dalgaları birçok gürültü kaynağı tarafından üretilebilmektedir. Bu nedenle, hayatımızın neredeyse her yerinde boşa harcanan enerjiler bulunmaktadır. Akustik enerji hasadı ile boşa giden ses dalgaları kullanılarak, düşük güç ihtiyacına sahip cihazların enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Aynı zamanda çevre dostu olan bu sistem mikro elektro mekanik sistem (MEMS) cihazlarının pillerini değiştirme potansiyeline de sahiptir.

Bu tez kapsamında, akustik ses basıncı kullanılarak piezoelektriksel etki ile enerji hasat etme üzerine bir sistem kurulmuştur. Sistemden elde edilecek enerjiyi arttırmak için 15 farklı Helmholtz rezonatörü tasarlanmıştır. Helmholtz rezonatörleri akustik basınca maruz kalırken, rezonans boşluklarındaki titreşim arttırıcı etkisiyle elde edilecek enerjiyi arttırma potansiyellerine sahiptir. Ayrıca bu rezonatörlerin sönümleyici etkileri de bulunmaktadır. Bu nedenle birçok alanda gürültü azaltıcı etkileri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında Helmholtz rezonatörlerinin, akustik enerji hasadı üzerinde yaptığı etkilerinin yanında, ayrıca gürültü azaltıcı etkileri de incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında tez çalışmasının amacı; literatürle uyumlu ancak farklı boyun çapları, boyun uzunlukları ve koni giriş çaplarına göre gruplandırılmış 15 adet Helmholtz rezonatörünün, farklı frekanslar altında akustik enerji hasadı ve gürültü azaltıcı etkilerini gözlemlemek ve nasıl geliştirilebileceği üzerine çözümler sunmaktır.

Deneyde kullanılan Helmholtz rezonatörleri, üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Rezonatörlerin üretiminde; üç boyutlu yazıcı ile üretiminin sorunsuz olması, maliyetinin düşük olması ve doğal kaynaklardan elde edilebilir olması gibi nedenlerden dolayı polilaktik asit (PLA) kullanılmıştır. Helmholtz rezonatörleri ve piezoelektrik diski sabitlemek için 60x60x0.4 mm alüminyum plak kullanılmıştır. Deneyler dört aşamadan oluşmuştur. Bunlardan ilki zorlayıcı olarak kullanılan hoparlör cihazının ses basıncı ölçüm deneyidir. Bu deneyde belirlenen frekanslardaki ses basınçları ölçülmüş ve ses basıncı seviyeleri elde edilmiştir. İkinci aşamada ise akustik ses basıncı altındaki rezonatörlerde ve plakta oluşan frekans-ivme değerlerine bakılmıştır. Ses dalgaları prototipe doğrudan etki ederken, lazer vibrometre yardımıyla Helmholtz rezonatörlerinde ve plak üzerinde lazer odaklanarak frekans-ivme ölçümleri yapılmıştır. Deneylerin üçüncü aşamasında akustik enerji hasadı gerçekleştirilmiştir. Plak üzerine rijit bağlanan piezoelektrik disk ve rezonatörler, hoparlör ile ses basıncına maruz bırakılmışlardır. Oluşan ses basınçları,

rezonatör boşluğunda bulunan piezoelektrik disk üzerinde titreşime neden olmaktadır. Titreşim nedeniyle oluşan şekil değiştirme enerjisi, piezoelektrik disk ile elektrik enerjisine dönüştürülmüş ve osiloskop yardımıyla voltaj-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bu deney sırasında prototiplerin yanlarına yerleştirilen mikrofon ile ses basıncı ölçümü yapılmıştır. Ölçüm sonucunda frekans-ses basıncı seviyesi grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler ile akustik enerji hasadı yapan sistemlerin, aynı zamanda gürültü azaltıcı etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda Helmholtz rezonatörlerinin gürültü azaltıcı etkisi gözlemlenmiştir. Literatürde ilk defa geniş bir frekans aralığında rezonatörün etkinliği araştırılmıştır. Frekans değiştikçe rezonatörlerin etkinliği de değişmektedir. Frekansa göre değişen bu etkinliğin nedenleri, yapılan kapsamlı deneysel analizlerle açıklanmıştır. Sistemin geliştirilebilmesi için, her Helmholtz rezonatörü özelinde uygun frekans aralıklarında spesifik çalışmalar yapılması gerekmektedir. Yapılan bu geniş kapsamlı çalışmada, birçok analiz yöntemine bakılarak, tasarlanan Helmholtz rezonatörlerinin akustik enerji hasadı ve gürültü azaltıcı sistemlerde kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Helmholtz rezonatörü, piezoelektrik enerji hasadı, akustik enerji hasadı, gürültü azaltma, piezoelektriksel etki, üç boyutlu yazıcı ile üretim

2024, 70 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Ali ÖZERMİŞ

Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gözde SARI

Research into energy harvesting has recently received a lot of interest. These research are critical for transforming waste energy into usable energy. Acoustic energy is a type of energy that has the potential to be recycled. Sound waves can be produced by a variety of noise sources, wasting energy in practically every part of our daily life. By harvesting acoustic energy from these discarded sound waves, it is possible to meet the energy requirements of low-power devices. Furthermore, this eco-friendly approach has the potential to replace the batteries in microelectromechanical systems (MEMS) devices.

This thesis describes a mechanism for harvesting energy utilizing the piezoelectric effect and sound pressure. To boost the system's energy output, 15 distinct Helmholtz resonators were built. When subjected to acoustic pressure, Helmholtz resonators have the ability to increase the energy gained through the vibrational amplifying effect in resonance cavities. These resonators also have damping effects, thus they are being studied for noise reduction in a variety of sectors. This thesis investigates the impact of Helmholtz resonators on both acoustic energy harvesting and noise reduction. In the context of this information, the goal of this thesis is to investigate the effects of noise reduction and acoustic energy harvesting on 15 Helmholtz resonators arranged based on various cone inlet diameters, neck lengths and neck diameters at different frequencies, and to offer suggestions for improvement.

The Helmholtz resonators utilized in the experiment were made with 3D printing technology. The resonators were produced of polylactic acid (PLA) material using a 3D printer due to its ease of manufacture, low cost, and availability from natural sources. The Helmholtz resonators and piezoelectric discs were secured with aluminum plates measuring 60x60x0.4 mm. The experiments had four stages. The first of these is the sound pressure measurement experiment of the speaker device used as a force. In this experiment, sound pressures in the specified frequency range were measured and sound pressure levels were obtained. In the second stage, the frequency-acceleration values in the resonators and on the plate were measured under acoustic pressure. While sound waves had a direct impact on the prototype, laser vibrometry was utilized to quantify frequency acceleration on the Helmholtz resonators and plate by focussing the laser. The third stage involved acoustic energy collection. Piezoelectric discs and resonators rigidly mounted to the plate were subjected to sound pressure from a speaker. The sound pressures created vibrations on the piezoelectric disk in the resonator cavity. The piezoelectric disc transformed the vibration-induced deformation energy into electrical energy, and an oscilloscope was used to obtain

voltage-time graphs. During this experiment, sound pressure measurements were made with a microphone placed near the prototypes and frequency-sound pressure level graphs were generated. The gathered data were utilized to investigate the noise-reduction effects of acoustic energy harvesting systems. The experiments revealed that Helmholtz resonators had a noise-reducing impact. For the first time in the literature, the resonator's effectiveness was tested throughout a large frequency range. The efficiency of the resonators varies with frequency. Comprehensive experimental investigations were used in this thesis to explain why this frequency-dependent efficacy exists. To improve the system, specialized research on the proper frequency ranges for each Helmholtz resonator are required. This long study demonstrated, via the application of numerous analysis methodologies, that the developed Helmholtz resonators can be employed in acoustic energy harvesting and noise reduction systems.

Keywords: Helmholtz resonators, piezoelectric energy harvesting, acoustic energy harvesting, noise reduction, piezoelectric effect, production with 3D printer

2024, 70 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında akustik ses basıncı kullanılarak, piezoelektriksel etki ile enerji hasadı üzerine bir sistem oluşturulmuştur. Sistemin içerisinde kullanmak üzere daha önce enerji arttırıcı etkisi kanıtlanmış ve gürültü azaltıcı sistemlerde kullanılan özgün Helmholtz rezonatörleri tasarlanmıştır. Oluşturulan sistemler geniş frekans aralıklarında incelenmiş, enerji hasadı ve gürültü azaltıcı etkileri gözlemlenmiştir. Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde akustik enerji hasadı, piezoelektrik enerji hasadı ve Helmholtz rezonatörleri üzerine yapılan literatür araştırmaları incelenmiştir. İkinci bölümde bu tez aşamasında karşılaşılan kavramlar olan, titreşim analizi, piezoelektriksel etki, enerji hasadı ve Helmholtz rezonatörleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde deney sistemi için gerekli olan malzemelerin tasarımları ve özellikleri, deney sistemlerinin hazırlanma süreci ve yapım aşamaları bulunmaktadır. Dördüncü bölümde, gerçekleştirilen deneylerin ve analizlerin sonuçları gösterilmiş, elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkiler belirtilmiştir. Son olarak beşinci bölümde ise elde edilen veriler yorumlanarak, literatürü destekleyecek ve literatüre katkı sağlayacak sonuçlar belirtilmiştir.

Tez çalışmam boyunca elinden geldiği her an, gece gündüz demeden desteklerini asla esirgemeyen, iyi bir akademisyen olduğu kadar harika da bir insan olan Sayın Doç. Dr. Gözde SARI'ya hem bilime hem de bana kattıklarından dolayı çok teşekkür ederim. Öğrenciniz olmaktan her zaman gurur duyacağım. Tezimin deneylerini gerçekleştirmek için ihtiyacım olan numunelerin, 3D baskı ile üretiminde yardımcı olan Arş. Gör. Nail ASLAN'a çok teşekkür ederim. Yükseköğrenim hayatım boyunca yolumu aydınlatan Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümündeki tüm değerli hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak daima yanımda olan, her zaman kararlarıma saygı duyan, beni her zaman destekleyen canım aileme ve desteklerini esirgemeyen tüm sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim.

Ali ÖZERMİŞ
Manisa, 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET I
ABSTRACT III
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ X
TABLOLAR DİZİNİ XII

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

İKİNCİ BÖLÜM
GENEL BİLGİLER

2.1. Titreşim Analizi 15
2.2. Piezoelektrik Etki 16
2.3. Enerji Hasadı 17
2.3.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanımı 17
2.3.2. Akustik Enerjinin Kullanımı 20
2.3.3. Helmholtz Rezonatörünün Kullanımı 22

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL VE METOT

3.1. Malzeme Tasarımı 27
3.1.1. Alüminyum Plak Tasarımı ve Malzeme Özellikleri 27
3.1.2. Piezoelektrik Disk Malzeme Özellikleri 28
3.1.3. Helmholtz Rezonatörünün Tasarımı ve Üretimi 29
3.2. Deneysel Yöntemler 36
3.2.1. Hoparlör Ses Basıncı Deneyi 36
3.2.2. Plak ve Rezonatörün Frekans-İvme Deneyi 38
3.2.3. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Voltaj Farkı Ölçümü 40
3.2.4. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Mikrofon Ses Basıncı Ölçümü 42

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Üç Boyutlu Yazıcıda Üretilen Rezonatörlerin Boyutlandırılması 43

4.2. Hoparlör Ses Basıncı Deneyi Araştırma Sonuçları 45
4.3. Plak ve Rezonatörlerin Frekans-İvme Deneyi Sonuçları 47
4.4. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Voltaj Farkı Ölçüm Sonuçları 51
4.5. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Mikrofon Ses Basıncı Ölçüm Sonuçları..... 56

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR 65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MEMS	Mikro elektro mekanik sistem
PLA	Polilaktik asit
İHA	İnsansız hava araçları
W	Güç
dB	Desibel
m	Kütle
c	Viskoz sönüm katsayısı
k	Yay rijitlik katsayısı
PZT	Lead zirconate titanate (Kurşun zirkonat titanat)
V	Volt
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
PVDF	Poliviniliden florür
CHR-TENG	Triboelektrik nanojeneratör
HR	Helmholtz rezonatörü
mm	Milimetre
F	Kuvvet
δ	Gerinim
σ	Gerilme
D	Elektriksel yer değiştirme
E	Elektriksel alan
s	Elastik uyumluluk
ε	Dielektrik sabiti

d	Piezoelektrik katsayı
T	Periyot
f	Frekans
c	Ses hızı
λ	Dalga boyu
SPL	Sound pressure level (Ses basıncı seviyesi)
Pa	Pascal
P	Basınç
$\mathbf{P_{ref}}$	Referans basınç
Z	Spesifik akustik empedans
S	Boyun alanı
L	Boyun uzunluğu
V	Boşluk hacmi
d	Çap
K	Kelvin
℃	Santigrat derece
$\mathbf{E_{11}}$, $\mathbf{E_{33}}$, $\mathbf{E_{15}}$	Piezoelektrik uzama sabiti
$\mathbf{C_{11}}$,$\mathbf{C_{12}}$,$\mathbf{C_{13}}$,$\mathbf{C_{33}}$,$\mathbf{C_{44}}$	Elastik rijitlik sabiti
$\boldsymbol{\varepsilon_{11}}$,$\boldsymbol{\varepsilon_{22}}$,$\boldsymbol{\varepsilon_{33}}$	Dielektrik sabiti
J	Joule
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
g	gram

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Zorlamalı ve sönümlü kütle yay sistemi 15
Şekil 2. 2. Doğrudan piezoelektrik etki [47] 16
Şekil 2. 3. Ters piezoelektrik etki [47] 17
Şekil 2. 4. Bir piezoelektrik titreşim enerjisi sistemi modeli [52] 19
Şekil 2. 5. AEH sistem şematik diyagram [53] 21
Şekil 2. 6. Örnek bir dikdörtgen tüp rezonatör [7] 23
Şekil 2. 7. Örnek bir Helmholtz rezonatörü [17] 23
Şekil 2. 8. Helmholtz rezonatörü modeli 24
Şekil 2. 9. HR ile sesin toplanması 24
Şekil 2. 10. Yüksek hızlı tren demiryolu için gürültü bariyeri çalışması [17] 26
Şekil 3. 1. Deneylerde kullanılan 60x60x0.4 boyutlu alüminyum plak 27
Şekil 3. 2. Plağa sabitlenmiş piezoelektrik disk 29
Şekil 3. 3. Boyun uzunlukları değişen 1. Grup Helmholtz rezonatörleri çizimi (a) İzometrik görünüm (b) Önden görünüm 30
Şekil 3. 4. Boyun çapları değişen 2. Grup Helmholtz rezonatörleri çizimi (a) İzometrik görünüm (b) Önden görünüm 31
Şekil 3. 5. Koni çapları değişen 3. Grup Helmholtz rezonatörleri çizimi (a) İzometrik görünüm (b) Önden görünüm 31
Şekil 3. 6. Üretim için kullanılan 3 boyutlu yazıcı 34
Şekil 3. 7. Sırasıyla boyun uzunluğu değişen A, B, C, D, E Helmholtz rezonatörleri 34
Şekil 3. 8. Sırasıyla boyun çapı değişen F, G, H, I, J Helmholtz rezonatörleri 35
Şekil 3. 9. Sırasıyla koni çapı değişen K, L, M, N, O Helmholtz rezonatörleri 35
Şekil 3. 10. Hoparlör ses basıncı deneyi dış görünüm 37
Şekil 3. 11. Hoparlör ses basıncı deneyi iç görünüm 37
Şekil 3. 12. İvme ölçümü iç görünüm boş plak 39
Şekil 3. 13. İvme ölçümü iç görünüm Helmholtz rezonatörü 39
Şekil 3. 14. Akustik enerji hasadı deney düzeneği dış görünüm 40
Şekil 3. 15. Akustik enerji hasadı deney düzeneği iç görünüm 41
Şekil 3. 16. Mikrofon ölçüm deney düzeneği 42
Şekil 4. 1. Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği 46
Şekil 4. 2. Helmholtz rezonatörü bulunmayan sistemin Frekans-İvme grafiği 49
Şekil 4. 3. Plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği 49
Şekil 4. 4. Boyun uzunluğu değişen plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği 50
Şekil 4. 5. Boyun çapı değişen plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği 50
Şekil 4. 6. Koni çapı değişen plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği 51
Şekil 4. 7. Boyutlu Voltaj (mV)-Frekans (Hz) grafiği 54
Şekil 4. 8. Rezonatörsüz ve boyun uzunlukları değişen Helmholtz rezonatörlü sistemlerin Frekans (Hz)-Boyutsuz Voltaj grafiği 54
Şekil 4. 9. Rezonatörsüz ve boyun çapları değişen Helmholtz rezonatörlü sistemlerin Frekans (Hz)-Boyutsuz Voltaj grafiği 55

Şekil 4. 10. Rezonatörsüz ve koni çapları değişen Helmholtz rezonatörlü sistemlerin Frekans (Hz)-Boyutsuz Voltaj grafiği 55
Şekil 4. 11. Tüm prototiplerin Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği 58
Şekil 4. 12. Helmholtz rezonatörlerinin boyun uzunluğunun incelendiği grubun Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği 58
Şekil 4. 13. Helmholtz rezonatörlerinin boyun çaplarının incelendiği grubun Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği 59
Şekil 4. 14. Helmholtz rezonatörlerinin koni çaplarının incelendiği grubun Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği 59
Şekil 4. 15. Helmholtz rezonatörsüz sistemin Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği 60

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1. Piezoelektrik malzeme özellikleri [47] 18
Tablo 2. 2. Piezoelektrik malzemelerin uygulama alanları [50,51] 19
Tablo 2. 3. Ses basıncı, ses basıncı seviyesi ve ses yoğunluğu arasındaki ilişki [53]22
Tablo 3. 1. 1050 H-14 alüminyum malzemenin özellikleri..... 28
Tablo 3. 2. Çalışmada kullanılan piezoelektrik diskin özellikleri 28
Tablo 3. 3. Helmholtz rezonatörleri grupları..... 30
Tablo 3. 4. Boyun uzunlukları değişen 1. grup Helmholtz rezonatörleri boyutları... 32
Tablo 3. 5. Boyun çapları değişen 2. grup Helmholtz rezonatörleri boyutları..... 32
Tablo 3. 6. Koni çapları değişen 3. grup Helmholtz rezonatörleri boyutları..... 32
Tablo 3. 7. PLA malzeme özellikleri [61]..... 33
Tablo 4. 1. Üretilen Helmholtz rezonatörlerinin tasarım ve gerçek boyutları..... 43
Tablo 4. 2. Üretim aşamasında oluşan farklılıkların yüzdesel değeri 44
Tablo 4. 3. Frekansa karşılık gelen ses basıncı seviyesi değerleri 46
Tablo 4. 4. Plağın ve plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin (HR) seçili rezonans frekansları (Hz) 48

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Enerji hasadı çalışmaları son yıllarda büyük bir ilgi uyandırmaktadır. Enerji hasadında ortam enerjisi yakalanarak, genellikle faydalı enerjiye dönüştürme işlemi yapılmaktadır. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve jeotermal gibi orta ile büyük ölçekli teknolojiler iyi bilinmektedir. Ancak enerji hasadı küçük ölçekli sistemlerde birincil güç kaynağını desteklemek ve alternatif enerji kaynağı olmak için kullanılmaktadır. Bakım gerektirmeyen ve çevre dostu olan bu sistem düşük güçlü elektronik cihazlar ve mikro elektro mekanik sistem (MEMS) cihazlarının pillerini değiştirme potansiyeline sahiptir.

Günlük hayatımızda ve çevremizde var olan akustik enerji, çevreye önemli bir olumsuz etkisi olmaksızın çıkarılabilen, üretilebilen ve tüketilebilen yeşil bir enerji olarak çok fazla göz önünde tutulmamaktadır. Akustik enerjinin hasadı ile kablosuz sensör ağları gibi yeni teknolojilerin de gelişimi devam etmektedir. Akustik enerji hasadı, akustik dönüştürücü veya rezonatör kullanarak ortamdan gelen yüksek ve sürekli akustik dalgalarını elektrik enerjisine dönüştürme işlemidir. Hasat edilebilir akustik emisyonlar, sıvılarda ve katılarda hidrostatik veya bükülen basınç dalgaları olarak yayılmaktadır. Mekanik dalgalar boyuna, enine ve yüzey dalgaları şeklini alır. Akustik enerji hasadı, diğer enerji toplama yöntemleri kadar popüler değildir. Çünkü ses dalgaları daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir ve bu tür enerji sadece çok gürültülü ortamlarda hasat edilebilmektedir. Bununla birlikte, belirli uygulamalar için enerji gereksinimleri de buna bağlı olarak düşüktür. Ayrıca gürültü kirliliğini azaltmak için gürültüyü gözlemleme zorunluluğu vardır. Böylece akustik enerjiyi geri kazanma ve onu kullanılabilir bir elektrik biçiminde depolama yeteneği, nispeten düşük güçlü cihazlara güç sağlamanın yeni bir yolunu bulmayı mümkün kılmaktadır.

Piezoelektrik kullanarak enerji üretme çalışmalarında, A. Ertürk, S. R. Anton ve ark. insansız hava araçları (İHA) için çok işlevli kanat çubuklarından, enerji toplayıcı kanat pervanesi elde etmek için temel tasarım faktörlerini incelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında piezoelektrik katmanların elektrik çıkışlarının farklı kombinasyonları ile çok katmanlı bir piezoelektrik güç jeneratörü kirişinin modellenmesi için elektromekanik formülasyon vermişlerdir. Bununla birlikte

maksimum yük girişini belirleyebilmek için mukavemet formülasyonlarına da bakmışlardır. Elektromekanik model kullanarak güç üretimine ve mukavemet analizlerini hem deneysel hem de analitik olarak incelemişlerdir [1]. Yine S. R. Anton, A. Ertürk ve ark. yukarıdaki çalışmalarını devam ettirmişler ve ikinci aşamada deneylere ve depolama uygulamalarına yer vermişlerdir. Bu makalelerinde ise kendi kendini şarj edebilen yapıların üretimini ve deneysel olarak incelenmesini içermektedir [2]. Araştırmalar sonucunda piezoelektrik enerji hasadında çok yönlülük sunan kendi kendini şarj eden yapılar kavramını kanıtlamışlardır. Ayrıca İHA'ların kanatlarına yerleştirilebilecek, yük taşıyan ve kendini şarj edebilen piezoelektrik cihazlarla birlikte yeni ince film pillerinin entegre olmasının mümkün olduğunu göstermişlerdir.

X. Tang ve ark. rastgele kuvvet ve hareket uyarımlarından titreşim enerjisi hasadı üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada çift kütleli bir hasat makinesi önermişlerdir. Parametreler optimize edildiğinde ve uyarma harmonik olduğunda, çift kütleli titreşim enerjisi hasat edicinin daha fazla güç toplayabildiğini ve tek kütleli konfigürasyondan daha geniş bir bant genişliğine sahip olduğunu kanıtlamışlardır [3].

S. B. Horowitz ve ark. mikro elektromekanik sistemler (MEMS) için akustik enerji toplayıcının geliştirilmesine yönelik ön sonuçlar sunan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada elektromekanik Helmholtz Rezonatörü vasıtasıyla akustik enerjiyi toplamayı planlamışlardır. Yapılan bu ön çalışma sonucunda 149 dB'lik akustik giriş ile $0.34\ \mu W/cm^2$ güç yoğunluğu elde etmişlerdir. Ancak daha iyi şartlarda 149 dB'lik akustik giriş ile $252\ \mu W/cm^2$ güç yoğunluğuna kadar ulaşılabileceği düşünülmektedir [4].

M. Lallart ve ark. piezoelektrik cihazlar kullanarak akustik enerji hasadının doğrusal olmayan optimizasyonu üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Bu şekilde çıkış voltajının doğrusal olmayan bir şekilde işlenmesini kullanarak enerji hasadı sürecinin geliştirilmesini önermekte ve bunun enerji dönüşümünü iyileştirdiğini, ayrıca frekans kaymalarına karşı hassasiyeti azalttığını öne sürmektedir. Yazarlar literatürdeki çalışmalar ile kendi çalışmalarını, çeşitli modellerden de yararlanarak teorik bir tartışma ile işlemişlerdir. Teorilerini doğrulamak amacıyla gerçekleştirdikleri deneysel ölçümler, önemli bir güç kazancı (standart yaklaşımdan yaklaşık on kat daha fazla)

sağlamaktadır. Böylece akustik enerji hasadında daha fazla verim almak adına önemli bir çalışma ortaya konmuştur [5].

Wei-Chung Wang ve ark. akustik enerji hasadı için farklı bir yaklaşım denemişlerdir. Piezoelektrik eğri kiriş ile sonik kristal boşlukları birlikte kullanmışlardır. Sonik kristal boşluğuna gelen akustik dalgaların, rezonans frekansında bu bölgede lokalize olması sağlanmıştır. Piezoelektrik eğri kiriş de bu bölgeye yerleştirilerek, rezonans frekansında oluşan titreşimlerin etkisiyle enerji hasadı gerçekleştirilmiştir [6].

B. Li ve ark. düşük duyulabilir frekanslarda hareket eden sesi hasat etmek için yeni ve pratik bir akustik enerji hasat mekanizması ortaya koymuşlardır. Çalışmadaki akustik enerji toplayıcı, düz tüp rezonatör içerisine yerleştirilmiş kurşun zirkonat titanat (PZT) piezoelektrik plakalardan oluşmuştur. Bu tüp rezonatör akustik rezonans frekansında gelen bir sesle uyarıldığında, tüp içindeki güçlendirilmiş akustik basınç, piezoelektrik plakaların titreşim hareketlerini yönlendirerek elektrik üretimini sağlamıştır. Ayrıca toplam voltajı ve gücü artırmak için tüpün içine birden fazla PZT plak yerleştirmişlerdir. Ancak plakların çok fazla olması, hava hareketlerini kesintiye uğratması nedeniyle sınırlı tutulmuştur. Deney sonucunda çıkış voltajının, gelen ses basıncıyla doğrusal arttığını gözlemlemişlerdir [7].

S. Salem ve ark. piezoelektrik diyafram kullanarak akustik enerji hasat ünitesi tasarlamışlardır. Deneyleri sırasında iki farklı yöntem izlemişlerdir. Açık devre deneylerinin yanı sıra kapalı devre deneyleri de yaparak, enerji hasadını en üst düzeye çıkaracak uygun devre empedansını bulmayı amaçlamışlardır. Önerilen tasarım $2.8 \times 10^{-9}\, W/cm^2$ güç hasat yoğunluğunda $21\, mV$ gerilim ve $2.05\, \mu W$ güç hasat etmişlerdir. Bu sonuçlar $118\, dB$ ses basınç seviyesi ve $466.2\, Hz$ frekansında gelen ses ile elde edilmiştir [8].

F. Mir ve ark. enerji hasadı özelliğine sahip ve aynı zamanda gürültü bariyeri işlevi görebilen bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistem meta duvar gürültü bariyeri olarak da adlandırılabilir. Çalışmada kauçuk-metal-beton kompozitten oluşan meta duvar birim tuğlaları, endüstriyel bir yapı malzemesi olarak önerilmektedir. Buradaki amaç, ses izolasyonunu sağlarken yapısal gücü korumakla birlikte akustik enerjiyi aynı anda kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmektir. Böylece izole edilen bol miktarda gürültü potansiyel bir enerjiye çevrilmiş olacaktır. Yapılan deneyin

sonucunda meta duvar gürültü bariyerinin, geleneksel gürültü bariyerine göre %60 oranında sesi azaltmasının mümkün olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca önemli miktarda güç çıkışı elde edilebileceğini ve bu gücün sokak lambaları için desteklenebileceğine değinilmiştir [9].

F. U. Khan ve Izhar, akustik enerji hasadındaki son gelişmeleri incelemişlerdir. Piezoelektrik ve elektromanyetik olmak üzere iki akustik enerji hasatçılarını (AEH'ler) karşılaştırmışlardır. Düşük iç empedans nedeniyle, elektromanyetik AEH'ler piezoelektrik AEH'lere kıyasla daha fazla güç ürettiği belirtilmiştir. Ayrıca elektromanyetik AEH'lerin rezonans frekansları (143-470 Hz), piezoelektrik AEH'lere (146-16.7 kHz) göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlarla birlikte, Helmholtz boşluklarının optimum tasarımı ve AEH'ler için verimli iletim mekanizmalarının iyi değerlendirilmesi gerektiğine değinilmiştir [10].

F. Liu ve ark. ayarlanabilir, çok serbestlik dereceli bir elektromekanik Helmholtz rezonatörü geliştirmişlerdir. Rezonatörün gürültü bastırma frekans aralığını pasif olarak ayarlamanın yolunu teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Rezonatörün fiziksel özelliği değiştirilmeden, elektromekanik yöntemler ile rezonans frekansları değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bir rezonans frekansının ayar aralığını optimize etmek, bir başka rezonans ayar aralığını bozmaktadır. Bu nedenle optimum ayarın henüz ele alınmadığını belirtmişlerdir [11]. Daha sonra F. Liu ve ark. elektromekanik Helmholtz rezonatörü kullanarak akustik enerji hasadı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada enerji dönüşümünün verimliliğini artırmak için enerji geri kazanım devresi de eklemişlerdir. Flyback dönüştürücü üzerinden bağlanan elektromekanik Helmholtz rezonatörünün, flyback devre topolojisinin doğasında bulunan empedans eşleşmesi nedeniyle, doğrudan şarj yöntemine göre enerjinin yeniden talep edilmesinde daha etkili olduğu gösterilmiştir. Flyback dönüştürücü, akım geçtiğinde enerjiyi depolamak ve güç kesildiğinde enerjiyi serbest bırakmak için karşılıklı bağlı indüktör kullanan bir güç kaynağı topolojisidir. Flyback dönüştürücü kullanılarak hasat edilen enerji 161 dB ses şiddetinde, doğrudan şarj devresine kıyasla %260'a kadar arttığını gözlemlemişlerdir. 161 dB ses şiddetinde elde ettikleri elektrik çıkış gücü ise yaklaşık 30 mW'dur. Bu güç seviyesi birçok düşük güçlü elektronik cihaz ve sensör için yeterli bir seviyedir [12].

S. Noh ve ark. Helmholtz rezonatörü kullanarak hem gürültü kontrolu hem de enerji hasadı üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Piezoelektrik konsolun mekanik rezonansı ile Helmholtz rezonatörün akustik rezonansını eşleştirerek enerji hasadı verimliliğini en üst düzeye çıkarmışlardır. Helmholtz rezonatörü kullanarak elde edilen voltaj, rezonatörsüz voltaja göre yaklaşık 5.3 kat fazla olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmanın, sürekli gürültülü ortamda belirli frekans bant genişliğindeki gürültüyü ortadan kaldırabileceğinden dolayı, çeşitli uygulama alanlarının olabileceğinden söz edilmiştir [13].

D. Guan ve ark. Helmholtz rezonans yapısındaki düşük frekanslı bant boşluklarını nümerik olarak araştırmışlardır. Frekans bandı boşluklarının bağımsız Helmholtz rezonatörlerinin yerel rezonanslarından kaynaklandığını, giriş genişliği ve uzunluğu gibi geometrik parametrelerine duyarlı olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Birinci bant aralığının daha düşük frekanslara geçtikçe, yapının düşük frekanslı gürültüyü absorbe etmesi adına faydalı olacaktır. Ayrıca yapı parametrelerini ayarlayarak bazı özel frekanslarda gürültüyü azaltmak için de kullanılabileceğine değinmişlerdir [14].

M. A. Ppillai ve E. Deenadayalan akustik enerji hasadı üzerine bir inceleme yazısı ele almışlardır. Akustik enerjinin önemi, yeşil enerjinin gelecekteki yeri ve önemine değinmişlerdir. Ayrıca çeşitli akustik ve termoakustik enerji hasadı teknikleri ile bu tekniklerin her birinden elde edilen maksimum güç hakkında bilgiler vermişlerdir. Termoakustik teknoloji görece daha yeni ortaya çıkan bir alandır. Burada ses dalgaları piezoelektrik cihazlar kullanılarak, elektriğe dönüştürülebildiği termoakustik motor adı verilen bir cihaz aracılığıyla ısıyı sese dönüştürerek güç üretmek için kullanılan yeni bir yöntemdir. Bu teknolojinin yüksek dönüşüm verimliliği, güvenilirlik, çevre dostu olma gibi önemli avantajlarından bahsedilmiştir. Ancak rejeneratör ve ısı eşanjörleri nedeniyle üretim maliyetleri yüksektir. Bu motorlar ile üretilen çıkış gücünün watt aralığında olduğundan bahsetmişlerdir. Yani diğer akustik enerji hasat teknikleriyle üretilene kıyasla oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Daha fazla çalışmaya ihtiyaç olan bu teknolojinin, enerji ihtiyacının sürekli olarak arttığı ve yeşil enerji öneminin her geçen gün hissedildiği bu dönemlerde, gelecekte çok önemli bir oynayacağına inanmaktalardır [15].

Hee-Min Noh yüksek hızlı trenlerin neden olduğu ses gürültüsünden faydalanarak akustik enerji hasat etme üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, pratik olması adına yüksek hızlı bir trenden gelen gürültü kullanılarak enerji hasat sistemini tasarlamıştır. 50-200 Hz'lik düşük frekanslı gürültünün yolcu, kabin ve vagonlar arası bölümlerde üretildiğini doğrulamıştır. Teorik modele dayanarak 174 Hz'lik bir hedef gürültü için Helmholtz rezonatörü tasarlamıştır. Ardından bu rezonatörün duvarlarındaki titreşimleri araştırmak için, ses kaynağı hoparlörler kullanarak sayısal simülasyon gerçekleştirmiştir. Daha sonra da çeşitli dikdörtgen ve dairesel piezoelektrik elemanlar kullanarak enerji hasadı deneylerini yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar, büyük dikdörtgen plaka kullanarak 100 dB'lik bir olay ses basıncı seviyesi için yaklaşık 0.7 V üretildiğini göstermiştir [16].

Y. Wang ve ark. da yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu ses gürültüsünü hem azaltma hem de değerlendirme adına bir çalışma ortaya koymuşlardır. Yukarıdaki çalışmadan farklı olarak burada belirlenmiş bir Helmholtz rezonatörü ve Poliviniliden Florür (PVDF) film kullanılmıştır. Bu çalışmadaki Helmholtz rezonatöründe gürültü toplamak için bal peteği şeklinde bir giriş modülü bulunmaktadır. Gürültü giriş modülü bulunan ve gürültü giriş modülü bulunmayan iki Helmholtz rezonatörünün gürültü toplama ve enerji hasadı performansları karşılaştırılmıştır. Helmholtz rezonatörlerinin içerlerine yerleştirilen mikrofon ile olay ses basınçları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarında gürültü giriş modülüne sahip rezonatörün içerisinde daha yüksek olay ses basıncı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca enerji hasadı performansı karşılaştırılmasında da gürültü giriş modülüne sahip rezonatörün daha yüksek voltaj elde ettiği belirlenmiştir. Sonuç olarak gürültü giriş modülünü içeren Helmholtz rezonatörünün, gürültü giriş modülü bulunmayan Helmholtz rezonatörüne kıyasla daha iyi bir performans sergilediği sonucuna varmışlardır [17].

X. Cui ve ark. akustik ızgaralı ve piezoelektrik plakalı bir ses enerjisi toplayıcı üzerinde çalışmışlardır. Metal yarık ızgara ile gelen akustik dalgayı, ızgara ve metal ekran arasındaki hava boşluğunda sıkıştırarak yüksek ses basıncı elde etmişlerdir. Buna bağlı olarak da metal ekranda titreşim artışı oluşmuştur. Deney sonucunda elde edilen voltaj çıktılarının iki akustik rezonans bölgesinde, 28 mV ve 30 mV olmak üzere iki sıçrama yaptığını gözlemlemişlerdir [18].

G. Liu ve ark. birleştirilmiş Helmholtz rezonatörlerinin periyodik düzenlemelerinden oluşan, geniş bantlı bir akustik enerji hasadı üzerine çalışma sunmuşlardır. İki kuplajlı kavite arasındaki piezoelektrik kompozit tabaka yardımıyla, kavitedeki akustik basınç fazlarının birbirine zıt etkileriyle yüksek bir çıkış voltajı elde edilebileceğini göstermişlerdir. Deneyde birleştirilmiş Helmholtz rezonatörü tasarımı, iki eş Helmholtz rezonatörü ve tekli Helmholtz rezonatörleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda birleştirilmiş Helmholtz rezonatörün yaklaşık 18 mV ile en yüksek voltaj çıktısını elde ettiği görülmüştür [19].

J. Li ve ark. membran tipi akustik metamalzeme kullanarak ses yalıtımı ve enerji dönüşüm verimliliği üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Önerilen metamalzeme cihazın ikili işlevselliği ile 20 dB'den fazla ses iletim kaybı ve metamalzemenin rezonans frekansı olan 356 Hz yakınlarında %15.3'e kadar maksimum enerji dönüşüm verimliliği gösteren deneysel sonuçlar elde etmişlerdir. Bu yeni özellikler ile metamalzeme cihazlarının havaalanları, otoyollar ve fabrikalar gibi yüksek gürültülü ortamlarda kullanımının uygun olabileceği düşünülmektedir [20].

M. Yuan ve ark. hem etkili düşük frekanslı ses yalıtımı hem de akustik enerji hasadı elde etmek için çok işlevli bir akustik yapı önermişlerdir. Burada piezoelektrik malzemenin alt tabakasını metalik bazlı kullanmışlardır. Kauçuk bazlı alt tabaka ile karşılaştırıldığında, metalik bazlı alt tabaka gerilim sürecini ortadan kaldırabilir ve pratik mühendislik uygulamaları için daha fazla dayanıklılık sağlayabileceği düşünülmektedir. Deneyde, birinci anti-rezonans frekansında önemli ölçüde gürültü izolasyonu ve birinci rezonans frekansında verimli akustik enerji hasadı, önerilen yapı ile elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Ancak birinci rezonans frekansında verimli enerji hasadı olmasına rağmen, ses izolasyon performansının tatmin edici olması beklenmemektedir. Bu dezavantaj, her katmanın farklı yerel rezonans özelliğine sahip olduğunu, genel ses izolasyon performansını iyileştiren ve enerji hasat frekans bandını genişleten çoklu konfigürasyonlar ile aşılabileceği belirtilmiştir [21].

H. Yuan ve ark. çalışmalarında akustik enerji hasadı amacıyla düşük maliyetli, kolay imal edilebilir ve yüksek performanslı, koni şeklinde Helmholtz rezonatör tabanlı Triboelektrik Nanojeneratör (CHR-TENG) önermişlerdir. Yazarlar CHR-TENG için şimdiye kadar bildirilen en iyi sonuçlarla karşılaştırıldığında, akustik enerji hasadının ses basıncı birimi başına %58.2 daha yüksek bir güç yoğunluğu elde

edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar, yüksek çıkış performansı, hafiflik, geniş frekans tepki bandı ve çevre dostu olma özelliklerini bir araya getiren akıllıca tasarlanmış CHR-TENG'in, nesnelerin interneti çağında sensör cihazlarına güç sağlamak için uygulanabilir bir akustik enerji hasadı yaklaşımını temsil edeceğini öngörmektedirler [22].

I. Kralov ve ark. gürültü kaynaklarından enerjinin alınması, dönüştürülmesi ve depolanması için standart çözümlerin temel işlevsel parametreleri arasında karşılaştırma yapmışlardır. Ayrıca akustik enerji hasadı ile demiryolu gürültüsünü azaltmanın mümkünlüğünü göstermişlerdir. Çalışmada, elektromanyetik ses basıncı hasatçıları, piezoelektrik ses basıncı hasatçıları ve sonik kristalli akustik enerji hasatçıları yöntemleri üzerinde durulmuştur. Tüm bu yöntemlerin, mikro elektromekanik sistemler açısından önemini vurgulamışlardır [23].

O. Gökhasan ve ark. raylı sistemler ve karayolları için hedeflenen, piezoelektrik malzeme kullanarak elektrik enerjisi üretiminin farklı malzemelerle karşılaştırmalı analizleri yaparak bir prototip model geliştirmişlerdir. Oluşturulan model ile farklı malzeme yapılarına sahip piezoelektrik blokların karşılaştırmalı sonuçlarını incelemişlerdir. Oluşturulan model ile otoyol kenarlarına döşenen ışıklar ile yolun aydınlatılmasını amaçlamışlardır. Yazarlar deney sonuçlarına göre, modelin başlangıcında kullanılan piezoelektrik malzemenin rezonans frekansını düşürmek, depolama elemanının daha kısa sürede dolmasını sağlayacağını keşfetmişlerdir. Ayrıca devrede kullanılan diğer malzemelerin güç kayıplarını minimuma indirmenin, devrenin verimliliğini artırabileceğini gözlemlemişlerdir [24].

L. Wu ve ark. sonik kristal ve piezoelektrik malzeme kullanarak bir akustik enerji toplayıcının geliştirilmesini sunmuşlardır. Mükemmel bir sonik kristalden bir çubuk çıkararak nokta kusuru oluşturmuşlardır. Bu boşluk, rezonans boşluğu gibi davranarak rezonans frekansındaki akustik dalgaları lokalize edebilmektedir. Deney sonucunda, gelen akustik dalganın frekansı 4.2 kHz olduğunda maksimum güç çıkışı elde edilmiştir. Ek olarak yazarlar, çıkış gücünü artırmak için piezoelektrik malzemelerin sabitini daha yüksek seçmek gerektiğini belirtmişlerdir [25].

M. Carrara ve ark. enerji hasadı için, eliptik bir akustik ayna kullanarak dalga odaklaması yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntemle dalgalar, piezoelektrik enerji toplayıcının bulunduğu odak noktaya iletilmektedir. Piezoelektrik ile güç üretiminde

30-70 kHz frekans aralığında, serbest bir hasat makinesine kıyasla akustik ayna kullanımı ile elde edilen enerji üretiminin daha fazla olduğunu göstermişlerdir [26].

P. Eghbali ve ark. akustik bir dikdörtgen tüp ile desteklenen ökzetik kafesli rezonatör önermişlerdir. Ökzetik rezonatörü, düz bir rezonatör ile karşılaştırmışlardır. Aynı rezonans-rezonans koşulu ve 100 dB ses gücü için neredeyse 8 katlık büyütme faktörü elde etmişlerdir. Bu büyütme faktörü, ses gücünün 110 dB ses basıncı seviyesinde neredeyse 10.1'e kadar çıkabilmektedir. Ayrıca ökzetik rezonatör için optimum yüksekliğin 46.5mm olduğunu (tüp yüksekliğinin %58'i) saptamışlardır [27].

M. Yuan ve ark. çalışmalarında akustik enerji hasadı gerçekleştirmek için yeni bir sarmal akustik rezonatör önermişlerdir. Önerilen bu yapı küçük bir hacim kaplar ve düşük frekans aralığı için uygundur. Akustik rezonans frekansı 175 Hz, 100 dB ses basıncı seviyesinde, hasat edilen gücün 7.3 μW'a kadar çıkabileceğini gözlemlemişlerdir. Yazarlar bu yapının düşük frekanslar için daha uygun olduğunu, ancak yüksek frekanslar için de geliştirilmeye açık olduğunu belirtmişlerdir [28].

F. U. Khan ve Izhar yeni bir hibrit akustik enerji toplayıcı sunmuşlardır. Ortamdaki akustik gürültü hem elektromanyetik hem de piezoelektrik dönüşüm mekanizmaları ile dönüşümde kullanılmıştır. Önerilen hasat makinesi bir Helmholtz rezonatöründen, bir piezoelektrik plaka üzerine monte edilmiş iki mıknatıstan ve mıknatısların altına yerleştirilmiş bir sargı bobininden oluşmaktadır. Laboratuvarda, 130 dB ses basıncı seviyesinde ve 2.1 kHz frekansta elektromanyetik dönüşümden 2.86 μW, piezoelektrik dönüşümden ise 50 μW optimum güç sağlanmıştır. Ayrıca ev tipi bir elektrik jeneratörünün gerçek akustik ortamında, akustik enerji toplayıcının elektromanyetik ve piezoelektrik kısımları tarafından sırasıyla 40 mV ve 123mV'lik tepe voltajları elde etmişlerdir [29].

M. Lallart ve ark. makalenin ilk bölümünde, piezoelektrik malzemelere sahip titreşimli bir membranın tek serbestlik dereceli modelini tanıtmış ve rezonans frekanslarından birine yakın frekansta, bir düzlem dalganın geldiği duruma uygulamışlardır. İkinci bölümde ise, frekanstaki değişikliklerle enerji toplayan cihazın davranışını tahmin etmek için bir model tanıtmışlardır. Bu model ile cihazdaki doğrusal olmayan işlemlerin neden olduğu sönümleme etkisini ve frekans değişikliklerini hesaba katmışlardır. Elde ettikleri güç yoğunlukları literatürde bulunan

değerlerden 10-10000 kat daha yüksektir. Bu nedenle, bu yapay artışın önüne geçmek ve gürültülü ortam seslerinde çalıştırılabilmesi için akustik bir optimizasyon (örneğin Helmholtz rezonatörü) önerilmektedir [30].

N. M. Papadakis ve G. E. Stavroulakis çok boyunlu Helmholtz rezonatörlerinin, rezonans frekansının hesaplanmasında sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile eklenen boyun yüzey alanını hesaba katan toplu eleman yaklaşımının sonuçları karşılaştırıldığında %1.1'den az hesaplama hatası gözlemlemişlerdir. Ancak aynı sonlu elemanlar analizi toplu eleman yaklaşımıyla (çok boyunlu) karşılaştırıldığında yaklaşık %40.3'e varan hesaplama hatası ile karşılaşmışlardır. Bu nedenle çok boyunlu Helmholtz rezonatörlerinin rezonans frekanslarının modellenmesinde, sonlu elemanlar yönteminin etkinliğinin genelleştirilebilmesi için daha fazla çalışma yapılması gerektiğini gözlemlemişlerdir [31].

N. N. Deshmukh ve ark. Helmholtz rezonatörünü enerji üretimi ve ses yalıtımı için değil, daha farklı bir ihtiyaçtan dolayı kullanmışlardır. Yazarlar bu çalışmada, yanma odalarında istikrarlı ve güvenli ısı üretimini sağlamak için, termo-akustik kararsızlıkları Helmholtz rezonatörü kullanarak sağlamışlardır. Çalışmada, Helmholtz rezonatörünün boşluk hacminin, boyun uzunluğunun ve boyun çapının, emici malzemenin kalınlığının termo-akustik kararsızlıkların sönümleme sürecindeki etkisinin incelenmesi üzerine yoğunlaşmışlardır. Deney sonucundaki verilere göre en iyi kombinasyonun, 30 dB'lik bir akustik sönümleme sağlayan %60 hacimde, 20 mm boyun uzunluğu ile 6 mm boyun çapı olduğu bulunmuştur. Ek olarak, Helmholtz rezonatörünün daha düşük hacimlerinde emici malzeme ilavesinin etkili olduğu ve emici malzeme kalınlığının belirli bir sınırın ötesinde artmasıyla rezonatörün sönümleme yeteneğinin azaldığını keşfetmişlerdir [32].

C. Song ve ark. 300-800 Hz aralığında hem ses emilimi hem de enerji hasadı gerçekleştirebilen, çapraz bağlı polipropilen (IXPP) ferroelektret filmlere sahip kademeli bir Helmholtz rezonatörleri dizisini incelemişlerdir. Bu yapı geniş bant çalışma frekansı sunabilen ve akustik enerjinin bir kısmını emebilen farklı boyutlarda dokuz Helmholtz rezonatörü içermektedir. IXPP ferroelektret filmleri, rezonans performansları sırasında ses enerjisini verimli bir şekilde toplamak için kullanılmıştır. Elde ettikleri çıkış güçleri nanowatt ölçeğindedir. Bu nedenle düşük güç tüketimine

sahip cihazlarda kullanılabilecektir. Sonuçların, çok işlevli uygulamalarda akustik cihaz yöntemini zenginleştirdiği, ayrıca enerji dönüşümünü ve ses emilimini aynı anda gerçekleştirebildiği vurgulanmıştır [33].

X. Cui ve ark. meta yüzey ve Helmholtz rezonatörünün entegrasyonuna dayalı bir akustik enerji toplayıcı önermişlerdir. Meta yüzey, yalnızca Helmholtz rezonatörünün kullanılması durumuna göre Helmholtz rezonatörüyle birlikte kullanıldığında ses yoğunluğunu 10 kat artırdığı görülmüştür. Ayrıca elde edilen voltajı ise 3.2 kat artırma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir [34].

J. Zhong ve ark. bant genişliğini artırmak ve enerji toplamayı iyileştirmek için çift kusurlu bir akustik meta malzeme önermişlerdir. Tek kusur dar bant genişliğinde etkisi sınırlı kalmasından dolayı, çift kusur yaratarak bu bant genişliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Yerel rezonansı artırmak amacıyla da sisteme Helmholtz rezonatörü eklenmiştir. Elde edilen sonuçları orijinal metamalzeme yapısı ile karşılaştırıldığında bant genişliğinin 52 Hz'den 81 Hz'e çıktığı ve maksimum voltajın ise 0.45 V'den 0.86 V'ye çıktığı görülmüştür [35].

B. Li ve ark. akustik enerji hasadı gerçekleştirmek için topolojik fononik kristaller tasarlamışlardır. Bu cihazlar yapının özellikleri nedeniyle daha sağlam olmakla birlikte, yüksek çalışma frekanslarına sahiptir. Deneysel sonuçları, bu cihazın topolojik kenar durumu nedeniyle iyi bir sağlamlığa sahip olduğunu ve nokta kusurları içerdiğinde de akustik enerjiyi iyi bir şekilde toplayabildiğini göstermektedir [36].

D. Li ve ark. düşük frekanslı bir akustik enerji toplama bariyeri sunmuşlardır. Amaçları, metro tüneli içindeki büyük gürültü enerjisini rasyonel bir şekilde kullanmak ve demiryolu boyunca algılama ve tespit ekipmanlarına, aydınlatma ekipmanlarına güç sağlayacak elektrik enerjisini üretmektir. Deneysel sonuçları, sistemin bir biriminin 100 dB'de 317.5 mV anlık voltaj ve 100.8 μW anlık maksimum güç üretebildiğini ve önerilen akustik enerji hasadı gürültü bariyerinin verimliliğini, uygulanabilirliğini göstermektedir [37].

M. A. Pillai ve Ezhilarasi D. Akustik tabanlı bir piezoelektrik enerji toplayıcı tarafından üretilen voltajı artırmak için farklı bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Esnek bir üçgen folyo PVDF konsol kirişine dik olarak bağlandığında, kirişteki gerilmede artış meydana gelmektedir. Ek olarak boyun bölgesinin sivriltilmesinin, Helmholtz

rezonatörünün akustik basıncının yükseltmesinde etkisinin olduğu gözlemlenmiştir [38].

E. Hassan ve ark. hem çevresel gürültüler için hem de akustik enerji hasadı için bir dizi piezoelektrik konsol plaka önermişlerdir. Simülasyon ile 1 metre uzaklıktan bariyere 85 dB'lik ses basıncı iletildiğinde cihazın 150 Hz'de 15 V voltaj ürettiği tespit edilmiştir. Akustik ses basıncı 100 dB'e çıktığında elde edilen voltaj 135 Hz'de 18.2 V'a çıkmıştır. Bu çalışmalarını literatürden tek plakalı bir yapı ile karşılaştırdıklarında, konsol plakanın içindeki her bir piezoelektrik malzemenin yaklaşık %33.9 daha fazla voltaj üretilebildiğini keşfetmişlerdir [39].

X. Peng ve ark. çift Helmholtz rezonatörü kullanarak, geliştirilmiş akustoelektrik transdüksiyonu ile akustik enerji üretimi üzerine çalışma sunmuşlardır. Deneyi bir piston içerisinde gerçekleştirmişlerdir ve iki Helmholtz rezonatörü arasına uyumlu bir delikli plaka yerleştirmişlerdir. Deney sonucunda ise iki Helmholtz rezonatörü kullanmanın çıkış gücünü 16 kat artırdığını göstermişlerdir [40].

Bangyan Duan ve ark. çalışmalarında çok frekanslı akustik enerjiyi nispeten düşük bir ses basıncı seviyesinde toplamak için kulak zarı ve kulak salyangozundan ilham alan bir PVDF piezoelektrik üreteci geliştirmişlerdir. Buradaki amaçları kulaktaki bu yapıyı örnek alarak, herhangi bir ses basıncı amplifikatörü veya rezonatör kullanmadan bir sistem tasarlamak olmuştur. Kulak salyangozundan belirli mesafe ilerledikçe, belirlenen kesit alanlarına piezoelektrik membran yerleştirilebileceği düşünülmüştür. Oluşturdukları bu sistem ile 100 dB ses seviyesinde ve 200 Hz frekansta, 8.45 μW güç çıkışı elde etmişlerdir. Böylece düşük maliyetli, hafif ve çok işlevli akustik enerji hasadı sistemi olarak, telsiz sensör ağlarının enerji sorununun üstesinden gelmeye yardımcı olabileceği vurgulanmıştır [41].

M. Yuan ve ark. geniş bantta düşük frekanslı akustik enerji hasadı gerçekleştirmek için, klasik Helmholtz rezonatörünü temel alan, yarıklı yeni bir Helmholtz rezonatörü önermişlerdir. Önerilen cihazın akustik rezonans frekansına yakın bant genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise dar yarıkların neden olduğu viskoz kayıp etkisidir. Yarıklı Helmholtz rezonatörünün deney sonucunda 100 dB ses basıncı seviyesi uygulandığında ölçülen elektrik gücü 2.4 μW olmuştur. Bu tür bir rezonatörün, rezonans ayarı için çeşitli alanlara uyarlanabileceği belirtilmektedir [42]. M. Yuan ve ark. başka bir çalışmalarında da özel tasarlanmış boyun ile kompakt

bir Helmholtz rezonatörü sunmuşlardır. Buradaki amaçları akustik viskoz kaybını azaltmaktır. Bu Helmholtz rezonatörünün deneysel sonuçlarında 100 dB ses basıncı seviyesi uygulandığında, 217 Hz'de maksimum 27.2 μW çıkış gücü ve 341 Hz'de maksimum 64.4 μW çıkış gücü toplanabileceği gösterilmiştir [43].

Y. Mao ve ark. uzatılmış boyunlu Helmholtz rezonatörünün rezonans frekanslarını ve iletim kaybını doğru ve hızlı bir şekilde tahmin etmek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Uzatılmış boyunlu Helmholtz rezonatörünün daha fazla rezonans frekansına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu Helmholtz rezonatörünün rezonans frekansları, boynun kesit alanı ve boşluğun hacminden ziyade yalnızca boyun uzunluğuna bağlı olması dikkat çekici bir özellik olarak sunulmuştur. Ayrıca birçok sayıda bulunan rezonans frekansları, neredeyse eşit frekans farklarına sahip olduğundan, turbo makinelerin toplam gürültüsünü kontrol etme potansiyeline dikkat çekilmiştir [44].

S. Kim ve ark. yüksek bir güç çıkışı oluşturmak için iki farklı ses yükseltme mekanizmasını (Helmholtz rezonansı ve çok yönlü akustik dalga odaklaması) birleştirmişlerdir. Daha sonra ise bu yapıya gradyan indeksli fononik kristal eklemişlerdir. Birleştirilmiş sistem deney sonucunda 47 dB ses basıncı seviyesi uygulandığında 4.1 μW güç çıkışı elde etmişlerdir. Önerilen akustik toplama sistemi, 1 kHz altındaki nispeten düşük frekanslarda maksimum güç üreterek, pratik bir avantaj sağlayabileceği belirtilmiştir [45].

Bu tez çalışmasının amacı, farklı boyutlara sahip Helmholtz rezonatörleri tasarlayarak, piezoelektrik malzeme yardımıyla voltaj çıktısı elde etmek ve aynı zamanda gürültü azaltıcı etkilerini incelemektir. Helmholtz rezonatörleri üzerinde yapılan çalışmalarda, çoğunlukla geniş hacimli bir taban ve üzerinde ince bir boyun yapılı tasarımlar karşımıza çıkmaktadır. Çok az bir bölümünde ise geniş hacimli bir taban ve gürültü giriş modülü bulunan, ancak boyun kısmı olmayan tasarımlar bulunmaktadır. Bunları dikkate alarak Helmholtz rezonatörü tasarımları, geniş hacimli taban üzerine boyun bölgesiyle birlikte gürültü giriş modülü de eklenerek yapılmıştır. Hem boyun bölgesinin hem de gürültü giriş modülünün ayrı ayrı voltaj artırıcı etkisi geçmişte yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır. Ancak ikisinin birlikte kullanımı rezonans frekanslarını da etkilediğinden optimum bir sonuç elde edilip edilemediğine bakılmıştır. 3 boyutlu yazıcı ile 15 adet Helmholtz rezonatörü üretilmiş olup,

tasarımlarda önemli etkenler olan boyun uzunlukları, boyun çapları ve gürültü giriş modüllerinin çapları (koni çapı) değiştirilmiştir. Böylece parametrelerin rezonans frekansına ve akustik enerji hasadına etkileriyle birlikte gürültü azaltıcı etkileri de değerlendirilmiştir. Değerlendirme işlemlerinde bulguları desteklemek amacıyla lazer vibrometre kullanılarak frekans-ivme cevap fonksiyonlarına bakılmıştır. Deneyler geniş frekans aralıklarında gerçekleştirilerek rezonatörlerin etkinliği incelenmiştir. Literatürde bulunan çalışmalar çoğunlukla düşük frekans aralığında veya özel olarak belirlenen yüksek frekans aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise frekans taraması yapılarak, tasarlanan Helmholtz rezonatörlerinin hem düşük hem de yüksek frekans aralıklarındaki tepkileri tartışılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

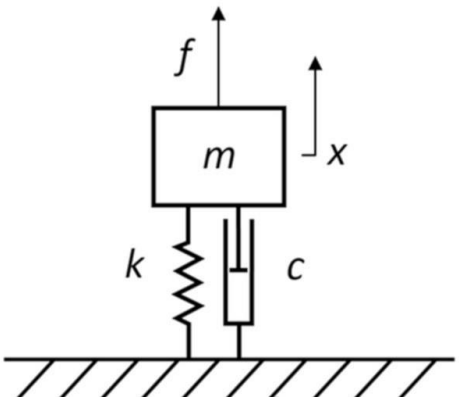
GENEL BİLGİLER

2.1. Titreşim Analizi

Titreşim hareketi, kendini belirli aralıklarla tekrarlayan periyodik bir harekettir. Titreşimin kendini tekrarlayabilmesi için geçen süreye periyot denmektedir. Titreşimin birim zamanda kendini tekrarlama sayısı ise titreşim frekansı olarak adlandırılmaktadır.

Titreşim türleri serbest titreşimler ve zorlamalı titreşimler olarak ikiye ayrılmaktadır. Sisteme başlangıçta bir enerji verildikten sonra dışarıdan başka bir kuvvet uygulanmıyor ve sistem salınım yapmaya devam ediyorsa, bu harekete serbest titreşim adı verilmektedir. Eğer sisteme salınım esnasında dış bir kuvvet etki ediyorsa zorlamalı titreşim olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 2.1'de zorlamalı ve sönümlü kütle yay sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Sistemin kuvvet dengesi, denklem (1)'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1. Zorlamalı ve sönümlü kütle yay sistemi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \tag{1}$$

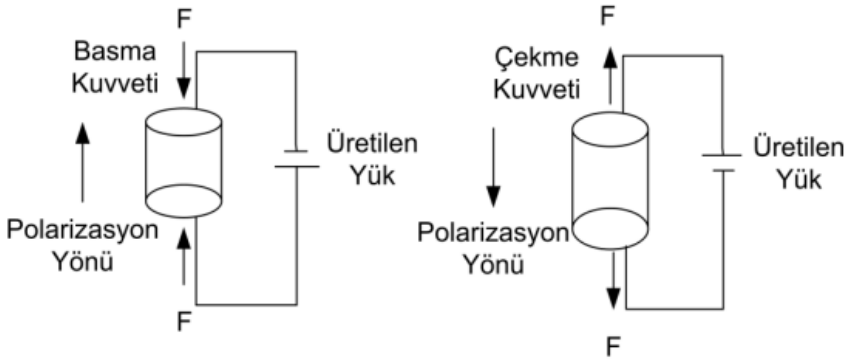
Denklemde m kütleyi, c sönüm katsayısını, k direngenliği, x kütlenin denge konumundan deplasmanını ve f zorlama fonksiyonunu ifade etmektedir. Sistemin serbest veya zorlamalı olması durumu ve sönümlü veya sönümsüz olması durumuna göre denklem kurgulanabilmektedir.

Kütle yay sistemi birçok yapıda olduğu gibi, piezoelektrik malzemelerin ve rezonatörlerin modellenmesinde de kullanılmaktadır.

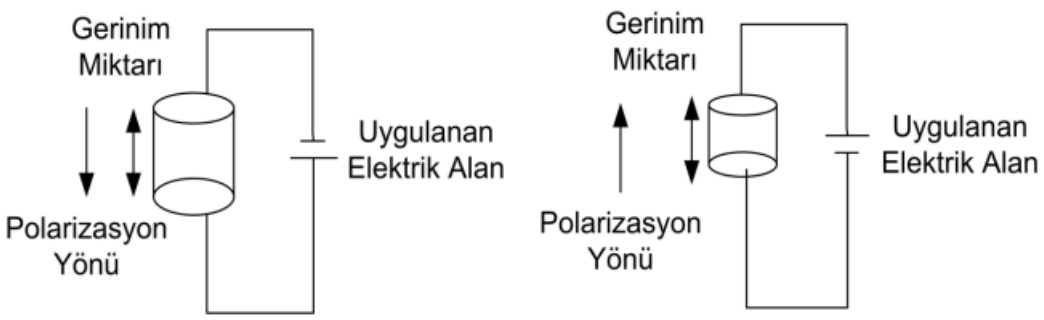
2.2. Piezoelektrik Etki

Piezoelektrik etki ilk olarak 1880 yılında Pierre Curie ve Jacques Curie tarafından keşfedilmiştir [48]. Mekanik bir etkiyi (mekanik gerilme veya gerinim) elektriksel bir tepkiye (elektrik alanı, elektriksel yer değiştirme veya polarizasyon) bağlanması doğrudan piezoelektrik etkisiyle oluşmaktadır [46]. Piezoelektrik malzemeler uygulanan basınç ile mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Bunun tersi de mümkündür. Piezoelektrik ile elektrik enerjisi, mekanik enerjiye çevrilebilmektedir.

Malzemenin üzerine mekanik basınç uygulandığında malzemede oluşan elektriksel gerilim ‘doğrudan piezoelektrik etki’ ile oluşmaktadır. Eğer piezoelektrik malzemeye elektriksel alan etki eder ve malzemede şekil değişimi yaratırsa buna da ‘ters piezoelektrik etki’ denmektedir. Doğrudan ve ters piezoelektrik etki prensipleri Şekil 2.2 ve 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Doğrudan piezoelektrik etki [47]



Şekil 2. 3. Ters piezoelektrik etki [47]

Doğrudan ve ters piezoelektrik etkiler aşağıdaki bünye denklemleri ile ifade edilmektedir:

$$\begin{bmatrix}\delta \\ D\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}s^E & d^t \\ d & \varepsilon^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma \\ E\end{bmatrix} \quad (2)$$

burada δ ve σ sırasıyla gerinim ve gerilmeyi ifade etmektedir. D ve E ise sırasıyla elektriksel yer değiştirme ile elektriksel alandır. s, ε ve d yine sırasıyla olmak üzere elastik uyumluluk, dielektrik sabiti ve piezoelektrik katsayıyı ifade etmektedir. E ve T üst simgeleri ilgili sabitlerin, sabit elektrik alanında ve sabit gerilmede değerlendirildiğini belirtir; üst simge t ise transpozisyonu temsil etmektedir [48].

2.3. Enerji Hasadı

2.3.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanımı

Piezoelektrik malzemeler piezoseramikler ve piezopolimerler olarak kategorize edilebilmektedir. Piezoseramikler büyük elektromekanik bağlantı sabitlerine sahiptirler ve yüksek enerji dönüşüm oranı sağlarlar. Ancak fazla kırılgan bir yapıları vardır. Piezopolimerler ise piezoseramiklere göre daha küçük elektromekanik bağlanma sabitlerine sahiptir, ancak bunun yanında oldukça esnektirler [49].

Sıkça kullanılan piezoelektrik malzemelere Kuvars minerali, Baryum titanat, Kurşun zirkonyum oksit – kurşun titanyum oksit alaşımı (PZT), (Pb,La) $(Ti,Zr)O_3$ alaşımı (PZT) ve Polivinilidin florür (PVDF) örnek verilebilir [50]. Enerji üretiminde ise çoğunlukla kullanılan, dört farklı piezoelektrik malzemenin özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2. 1. Piezoelektrik malzeme özellikleri [47]

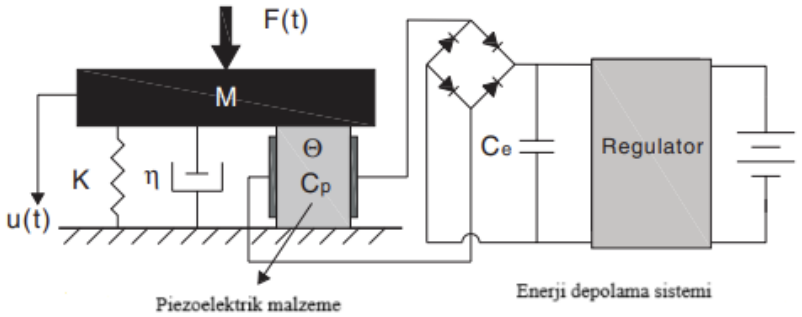
Özellik	**PZT-5H (seramik)**	**PMN-32PT <001> oryantasyonu (tek kristal)**	**PZT-polimer kompozit (%30 PZT)**	**PVDF (polimer)**
Yoğunluk (g/cm^3)	7.65	8.10	3.08	1.78
Dielektrik Sabiti	3250	7000	380	6
Elastik Modülü (GPa)	71.4	20.3	-	2
Piezoelektrik Yük Sabiti, d_{33}(pC/N)	590	1620	375	25
Piezoelektrik Yük Sabiti, d_{31}(pC/N)	-270	-760	-	12-23
Elektromekanik Kaplin Faktörü	0.75	0.93	-	0.22

Piezoelektrik malzemeler çoğunlukla biyoteknoloji, makine mühendisliği, medikal mühendisliği, yarı iletken malzeme üretimi alanlarında kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına örnekler ise Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. 2. Piezoelektrik malzemelerin uygulama alanları [50,51]

Doğrudan Piezoelektrik Etki		**Ters Piezoelektrik Etki**	**Doğrudan ve Ters Piezoelektrik Etki**
Sensör	Üreteç	Aktif titreşim azaltma	Ultrasonik sonar cihaz
Hızlandırıcı	Yüksek voltaj kıvılcım ateşleyici	Nano konumlandırma	Mesafe Ölçüm cihazı
Vuruş sensörü	Enerji üretimi	Yüksek kuvvet çalıştırma	Ultrasonik malzeme karakterizasyonu
Basınç sensörü	Zil dönüştürücü enerji üretimi	Tekstil makineleri fanı	Transformatörler
Dinamik gerilme sensörü		Ultrasonik motor	

Bir piezoelektrik enerji toplayıcı genellikle Şekil 2.4'te şematik olarak gösterilen bir enerji depolama sistemiyle birlikte, kütle + yay + sönümleyici + piezo yapısı olarak modellenmektedir.



Şekil 2. 4. Bir piezoelektrik titreşim enerjisi sistemi modeli [52]

Bu çalışmada doğrudan piezoelektrik etki ile enerji üretimi üzerinde çalışılmaktadır. Ayrıca akustik enerjinin etkisi ile Helmholtz rezonatörünün etkisi, piezoelektrik malzeme yardımıyla incelenmektedir.

2.3.2. Akustik Enerjinin Kullanımı

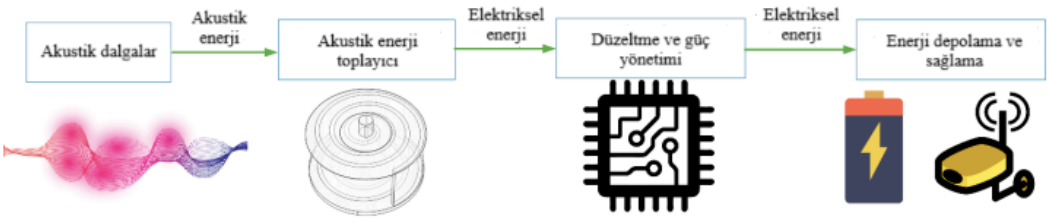
Enerji hasadında daha çok, atık enerjinin bazı yöntemler ile toplanarak düşük güç gereksinimi olan cihazlara yönlendirilmesi üzerinde durulmaktadır. Bunun nedeni de elde edilen enerjinin düşük miktarlarda olmasıdır. Birçok alanda titreşim enerjisinin değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları çevresel kaynakların kullanılması (ses dalgaları, elektromanyetik dalgalar), insan vücudundaki hareketler (kan basıncı, kol-ayak hareketleri), taşıma araçları, yollar-köprüler ve endüstriyel araçlar (motorlar, pompalar) söylenebilir.

Akustik ses dalgaları, enerjiye sahip olan ve birçok gürültü kaynağı tarafından üretilebilen mekanik dalgalardır. Eğer ses dalgaları istenmeyen bir durumda olursa buna gürültü denmektedir. Yaygın gürültü kaynakları arasında uçaklar, araçlar, hızlı trenler, hoparlörler örnek olarak verilebilir. Günümüzde gürültülü bir dünyada yaşadığımız düşünülürse, akustik enerjiyi verimli şekilde kullanmak önem arz etmektedir. Ek olarak, diğer çevresel enerji türleriyle (güneş, rüzgâr ve hidroelektrik) karşılaştırıldığında akustik enerji hava koşullarından daha az etkilenmektedir [53].

Genellikle akustik enerji, yayılma aşamasında termal enerjiye dönüşür ve en fazla ilgiyi düşük ve orta frekanslı ses dalgaları çekmektedir. Bunun bir nedeni, gürültünün bu frekans bandının genellikle spektrumun önemli bir bileşeni olmasıdır. Diğer nedeni ise bu frekans aralığında karşılık gelen ses dalga boyunun uzun olması ve bu durumun çoğu mühendislik yapısı kullanılarak sesin emilmesini veya izole edilmesini zorlaştırmasıdır [53].

Rezonans, sürekli titreşimlerden veya akustik dalgalardan enerji hasat etmek için önemli bir unsur olmaktadır. Akustik enerji hasadı (AEH) tekniği ile ilgili olarak, çevresel akustik dalgalar zayıf uyarma kaynaklarına ait olduğundan, AEH cihazının tasarımı titreşim bazlı enerji toplayıcınınkinden farklıdır. Akustik rezonans, gelen ses dalgasını yükseltmek ve enerji dönüşüm parçasını yeterince harekete geçirmek için kullanılabilen AEH tasarımında oldukça önemlidir [53,54].

Akustik enerjiyi elde etmek, elektrik enerjisine dönüştürmek ve depolamak için çeşitli sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.5'te bir AEH sistemin şematik diyagramı sunulmuştur.



Şekil 2. 5. AEH sistem şematik diyagram [53]

Bir akustik dalganın ilerleme hızı aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$V = \lambda \frac{1}{T} = \lambda f \tag{3}$$

Burada V ilerleme hızı, λ dalga boyunu, T periyodu ve f ise frekansı temsil etmektedir. Ses hızı ($c = 343\, m/s$; 20°C), dalga boyu ve frekans arasındaki ilişki denklem 4'te verilmiştir.

$$c = \lambda f \tag{4}$$

Ses dalgaları ile bir akustik enerji üretimi yapmak için, ses basıncı kavramı önem arz etmektedir. İşitilebilir ses basıncı büyük ölçüde değişiklik göstermektedir ve metrik logaritmik ölçek ses basıncı düzeyi (SPL) genellikle etkili bir ölçüm indeksi olarak kullanılmaktadır [53].

$$SPL = 20log_{10}(P/P_{ref}) \tag{5}$$

P ölçülen kök-ortalama-kare ses basıncıdır. P_{ref} ise referans ses basıncını temsil eder ve havada 20 µPa değerindedir. SPL'nin birimi desibeldir (dB). Ses basıncı P, bir sonraki adımda ses yoğunluğu I'ya (dik yönde birim alan başına akustik güç) bağlanabilir. Düzlem dalga yayılım durumu için ilişki denklem 6'da verilmiştir [53]:

$$I = Pv = P^2/Z \tag{6}$$

burada v parçacık hızı ve Z spesifik akustik empedanstır.

Ardından ses gücü Pow (ses basıncı P ile karışıklığı önlemek için) denklem 7'de gösterilmiştir.

$$Pow = IA = (P^2A)/Z \quad (7)$$

Denklemde A olay yüzey alanını ifade etmektedir.

Tablo 2.3'te ses basınçlarının tipik değerleri ve bunlara karşılık gelen SPL ve ses yoğunluğu değerleri listelenmektedir.

Tablo 2. 3. Ses basıncı, ses basıncı seviyesi ve ses yoğunluğu arasındaki ilişki [53]

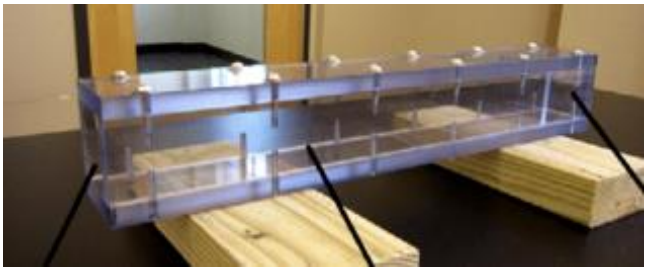
Ses Basıncı (Pa)	SPL (dB)	Ses Yoğunluğu (W/m^2)
0.2	80	0.0001
1	94	0.0025
2	100	0.01
10	114	0.25
100	134	25
2000	160	10000

2.3.3. Helmholtz Rezonatörünün Kullanımı

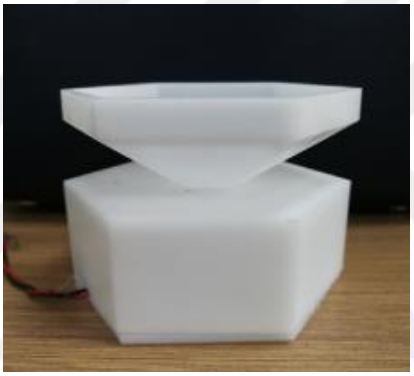
Piezoelektrik malzeme yardımıyla, akustik ses basıncından enerji hasat etmenin mümkün olduğu daha önceki konularda bahsedilmiştir. Ancak hasat edilen enerjinin az olması önemli bir dezavantajdır. Literatürde elde edilen enerjiyi artırmak için çeşitli yöntemler denenmektedir. Bunlardan en yaygın olanları ise rezonatörlerdir. Rezonatörlerde amaç, hem sahip oldukları boşluk ile akustik basıncı arttırmak hem de sistemin rezonans frekansında ciddi bir titreşim etkisi yaratmaktır. Ayrıca rezonatörler gürültünün azaltılması için de kullanılmaktadır. Hem enerji hasadına etkisi hem de gürültü azaltımı etkisi, rezonatörleri oldukça önemli kılmaktadır.

Çeşitli rezonatörler ile literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Ancak akustik enerji hasadı için çoğunlukla Helmholtz rezonatörü kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da bir

dikdörtgen tüp rezonatör ve Şekil 2.7'de bir Helmholtz rezonatörü örnekleri verilmiştir.

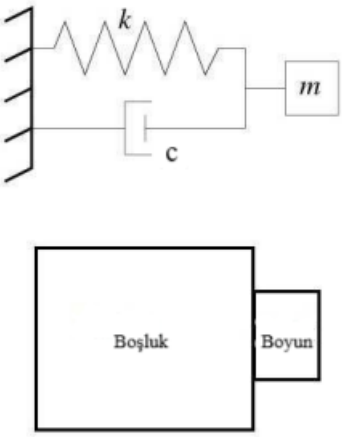


Şekil 2. 6. Örnek bir dikdörtgen tüp rezonatör [7]

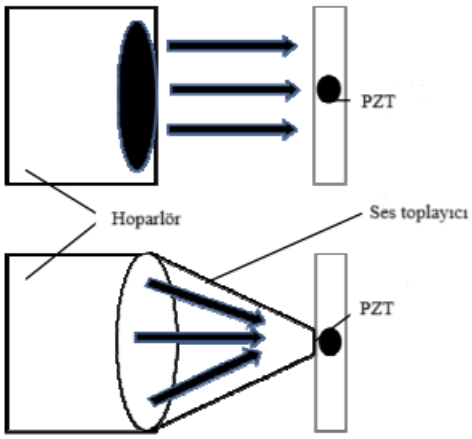


Şekil 2. 7. Örnek bir Helmholtz rezonatörü [17]

Helmholtz rezonatörü adını Alman fizikçi Hermann von Helmholtz'dan almaktadır. Tipik bir Helmholtz rezonatörü (HR) kapalı bir boşluk ve devam eden bir boyun bölgesinden oluşmaktadır. Gelen ses dalgasının frekansı, HR'nin ilk öz frekansı ile eşleştiğinde, boyundaki hava bir kütle olarak salınırken, boşluktaki statik hava bir yay gibi sıkışma ve genleşmeye maruz kalmaktadır. Boyun girişinden gelen ses yayılımının bir sönümleyici olduğu HR, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi kütle-yay-sönüm sistemi olarak modellenebilir [55]. Şekil 2.9'da ise bir HR'nin toplama özelliği gösterilmiştir [58].



Şekil 2. 8. Helmholtz rezonatörü modeli



Şekil 2. 9. HR ile sesin toplanması

Bir HR'nin boşluk rezonans frekansı denklem 8'de verilmiştir [17, 55, 56].

$$f_0 = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{LV}} \tag{8}$$

c = Ses hızı

S = Boyun alanı

L = Boyun uzunluğu

V = Boşluk hacmi

Dairesel bir boyun alanı ise şu şekilde hesaplanabilir.

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \tag{9}$$

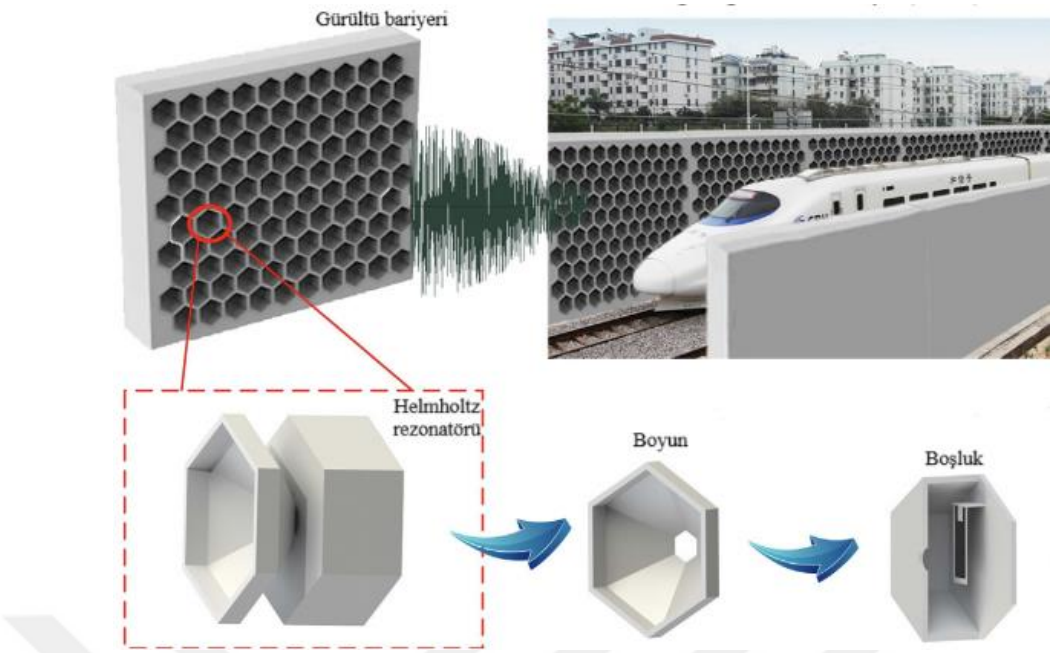
d = Boyun çapı

HR rezonans frekansında uyarıldığında, gelen ses basıncı, boşluktaki ses basıncı çıkışının tepe değerini elde etmek için rezonans olarak yükseltilir. Basınç yükseltme faktörü A, boşluktaki ses basıncının gelen ses basıncına oranını ifade etmektedir [17].

$$A = \frac{P_{boşluk}}{P_{gelen}} = 2\pi\sqrt{\frac{(LV)^3}{S^3}} \tag{10}$$

Helmholtz rezonatörlerinin diğer bir kullanım noktası ise pasif gürültü kontrol mekanizması olmasıdır. Pasif gürültü kontrolü, ses kaynağına yakın ortamı değiştirerek sesi bastırmayı amaçlayan yöntemleri ifade etmektedir. Bu yöntemlerde giriş gücüne ihtiyaç duyulmadığından pasif gürültü kontrolü genellikle aktif kontrolden daha ucuzdur. Ancak pasif sistemin performansı orta ve yüksek frekanslarla sınırlıdır. Aktif kontrol düşük frekanslar için iyi çalışır ve dolayısıyla daha geniş bant aralığındaki gürültünün azaltılması için iki yöntemin kombinasyonu kullanılabilmektedir [57].

HR etkisi, boyundaki havanın hareketinden kaynaklanır. Helmholtz boşluk rezonansı, pasif gürültü kontrol mekanizmalarında, yapının sesi sönümlemesini sağlayan tasarım parametreleri değiştirilerek kullanılmaktadır. Helmholtz rezonatörleri hem otomobillerde hem de uçaklarda kabin seslerini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde endüstriyel gürültüleri en aza indirmek için gürültü bariyeri olarak kullanılmıştır [57]. Şekil 2.10'da HR'nin gürültü bariyeri olarak kullanıldığı bir çalışma gösterilmiştir.



Şekil 2. 10. Yüksek hızlı tren demiryolu için gürültü bariyeri çalışması [17]

Helmholtz rezonatörü üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Farklı tasarımlar ve kombinasyonlar ile hem akustik enerji hasadında hem de gürültü azaltımı konusunda önemli bulgular ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilir enerji için de önemli bir konumda olan Helmholtz rezonatörleri, verimliliği ve işlevselliği artarak, maliyetleri ise azalarak, gelecekte özellikle mikro elektromekanik sistemler için önemli rol oynaması beklenmektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

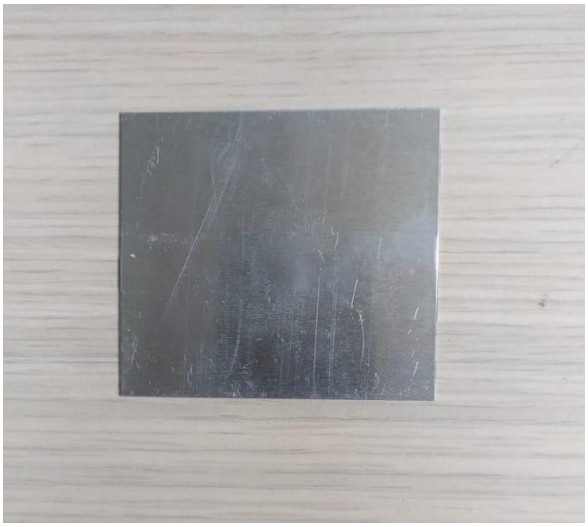
MATERYAL VE METOT

3.1. Malzeme Tasarımı

3.1.1. Alüminyum Plak Tasarımı ve Malzeme Özellikleri

Deneylerde kullandığımız en temel malzeme alüminyum plaktır. Tüm deneyler boyunca da tek bir alüminyum plak kullanılmıştır. Alüminyum plak üzerine rijit bağlanan piezoelektrik diskle birlikte, akustik dalgalar ile oluşacak olan titreşimlerden enerji elde edilmesini sağlayan parçalardan biri olmaktadır. Plak, deney ortamı, araç ve gereçleriyle birlikte, bu alanda daha önce yapılan çalışmalar [59] ve [60] doğrultusunda tasarlanmıştır. Pratik mühendislik uygulamaları için daha fazla dayanıklılık sağlayabileceği düşünülerek metalik bazlı plak kullanılmıştır [21].

Çalışmada kullanılan plak 1050 H-14 alüminyum malzemeden yapılmıştır. Plak boyutları 60x60x0.4mm olarak tasarlanmıştır. Kullanılan plak Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Malzemenin özellikleri ise Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Deneylerde kullanılan 60x60x0.4 boyutlu alüminyum plak

Tablo 3. 1. 1050 H-14 alüminyum malzemenin özellikleri

Özellikler	Değerler
Yoğunluk	2710 kg/m^3
Erime noktası	650 ℃
Isıl genleşme	$24x10^{-6}/K$
Elastisite modülü	71 GPa
Isıl geçirgenlik	222 W/mK
Elektrik özdirenci	$0.0282x10^{-6}\Omega m$
Poisson oranı	0.33

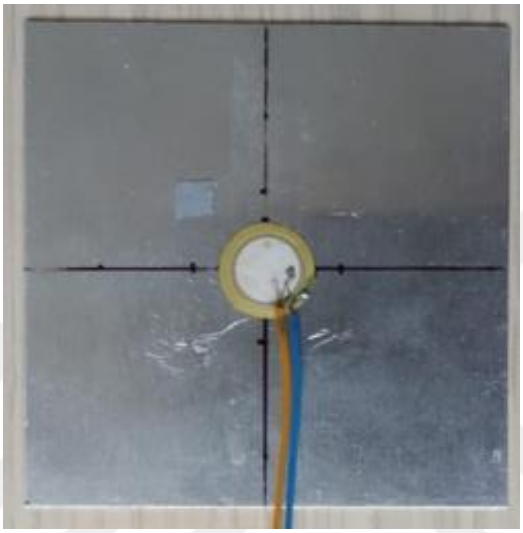
3.1.2. Piezoelektrik Disk Malzeme Özellikleri

Piezoelektrik disk, çalışmamızda akustik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürecek olan malzemedir. Deney boyunca tek bir piezoelektrik disk kullanılmıştır ve plağın tam orta noktasına gelecek şekilde rijit bağlanmıştır. Şekil 3.2'de plağa sabitlenmiş piezoelektrik disk gösterilmiştir. Disk seçiminde verimlilik, kullanım alanı ve maliyet gibi unsurlar göz önüne alınmıştır. Boyutları Helmholtz rezonatörlerine sığacak şekilde düşük çaplarda olmasına dikkat edilmiştir. Kullanılan malzeme, Murata 7BB-12-9 markalı PZT 5H kurşun-zirkonyum-titanyum piezoseramik disktir. Diskin çapı 8 mm ve kalınlığı 0.1 mm'dir. Piezoelektrik diskin malzeme özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2. Çalışmada kullanılan piezoelektrik diskin özellikleri

Özellikler	Değerler
Piezoelektrik Uzama Sabiti E_{11}	$-6.5\ C/m^2$
Piezoelektrik Uzama Sabiti E_{33}	$23.3\ C/m^2$
Piezoelektrik Uzama Sabiti E_{15}	$17\ C/m^2$
Elastik Rijitlik Sabiti C_{11}	$126 \times 10^9\ N/m^2$
Elastik Rijitlik Sabiti C_{12}	$79.5 \times 10^9\ N/m^2$
Elastik Rijitlik Sabiti C_{13}	$84.1 \times 10^9\ N/m^2$

Elastik Rijitlik Sabiti C_{33}	117×10^9 N/m^2
Elastik Rijitlik Sabiti C_{44}	23.3×10^9 N/m^2
Dielektrik Sabiti ε_{11}	15.03×10^{-9} F/m
Dielektrik Sabiti ε_{22}	15.03×10^{-9} F/m
Dielektrik Sabiti ε_{33}	15.03×10^{-9} F/m
Yoğunluk	7500 kg/m^3



Şekil 3. 2. Plağa sabitlenmiş piezoelektrik disk

3.1.3. Helmholtz Rezonatörünün Tasarımı ve Üretimi

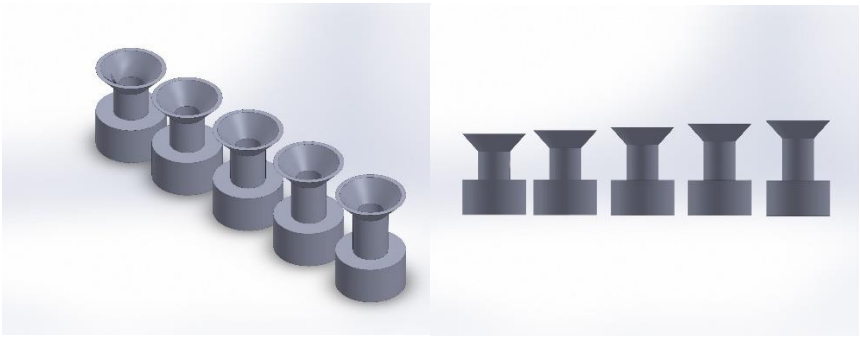
Helmholtz rezonatörleri boşlukta oluşturdukları akustik basınç ve rezonans ile akustik enerji hasadı çalışmalarında kullanılmaktadır. Boşlukta oluşacak rezonanslar sistemimizin önemli bir parçası olacaktır. Bu nedenle denklem (8)'de verilen, rezonans frekansına etkisi olan özelliklere göre tasarımlar oluşturulmuştur. Tüm Helmholtz rezonatörü tasarımlarında boşluk hacmi sabit tutulmuştur. Rezonansa etki eden diğer iki özellik olan boyun uzunlukları ve boyun çapları değiştirilerek farklı tasarımlar oluşturulmuştur. Bunlara ek olarak, HR'lerin boyun bölgesine konik bir toplayıcı eklenmiştir. Konik yapı, bu tez çalışmasının özgün tarafı olmaktadır. Tasarımda Y. Wang ve ark. çalışmalarında oluşturduğu bal peteği şeklindeki Helmholtz rezonatöründen esinlenilmiştir [17]. Konik yapının farklı etkilerini görmek adına koni giriş çapları değiştirilmiştir.

Deneyde toplam 15 adet Helmholtz rezonatörü tasarlanmıştır ve bunları üç gruba ayırmak mümkündür. Her grupta tek bir özellik değiştirilerek sisteme etkileri gözlemlenmiştir. Deney sürecinde karışıklık yaşanmaması adına her HR bir harf ile simgelenmiştir. Gruplar Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. 3. Helmholtz rezonatörleri grupları

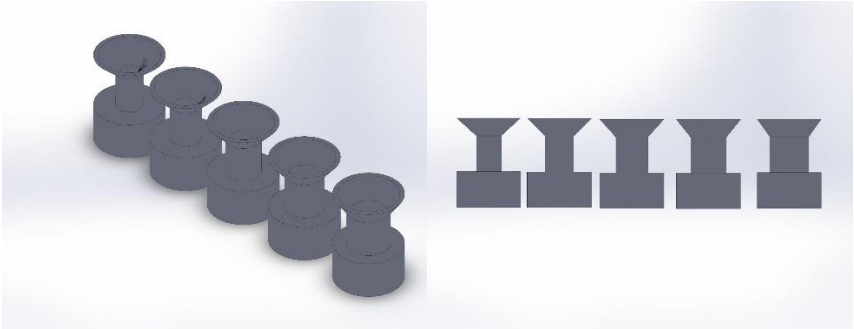
Boyun uzunlukları değişen A, B, C, D, E Helmholtz rezonatörleri	1. Grup
Boyun çapları değişen F, G, H, I, J Helmholtz rezonatörleri	2.Grup
Koni çapları değişen K, L, M, N, O Helmholtz rezonatörleri	3.Grup

Her grup için izometrik ve önden görünümler Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5'te gösterilmiştir.



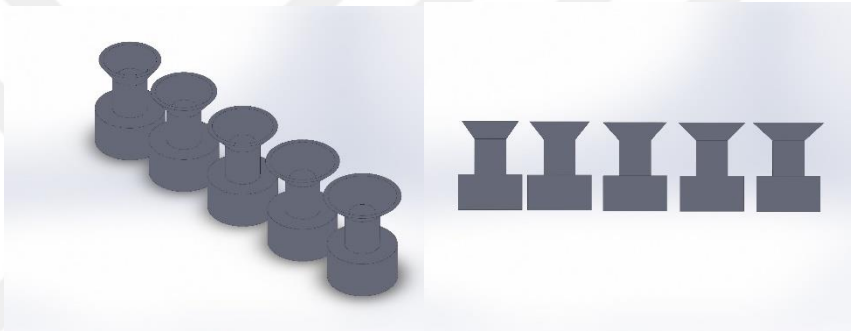
(a) (b)

Şekil 3. 3. Boyun uzunlukları değişen 1. Grup Helmholtz rezonatörleri çizimi (a) İzometrik görünüm (b) Önden görünüm



(a) (b)

Şekil 3. 4. Boyun çapları değişen 2. Grup Helmholtz rezonatörleri çizimi (a) İzometrik görünüm (b) Önden görünüm



(a) (b)

Şekil 3. 5. Koni çapları değişen 3. Grup Helmholtz rezonatörleri çizimi (a) İzometrik görünüm (b) Önden görünüm

Şekillerde de belli olduğu üzere 1. grubun boyun uzunlukları farklı, geri kalan tüm özellikleri aynıdır. 2. grubun ise boyun çapları farklı geri kalan özellikler yine aynıdır. Son olarak 3. grupta sadece boyun üstü koni giriş çapları değişmektedir. Tüm Helmholtz rezonatörlerinin boşluk hacimleri ve malzemeleri sabit tutulmuştur. Rezonatörlerin boyut bilgileri Tablo 3.4, 3.5 ve 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3. 4. Boyun uzunlukları değişen 1. grup Helmholtz rezonatörleri boyutları

Boyut Bilgisi	A	B	C	D	E
Boşluk Çapı (mm)	18	18	18	18	18
Boşluk yüksekliği (mm)	10	10	10	10	10
Boyun Çapı (mm)	9	9	9	9	9
Boyun uzunluğu (mm)	8	9	10	11	12
Koni çap (mm)	18	18	18	18	18
Koni yükseklik (mm)	5	5	5	5	5
Kalınlık (mm)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

Tablo 3. 5. Boyun çapları değişen 2. grup Helmholtz rezonatörleri boyutları

Boyut Bilgisi	F	G	H	I	J
Boşluk Çapı (mm)	18	18	18	18	18
Boşluk yüksekliği (mm)	10	10	10	10	10
Boyun Çapı (mm)	7	8	9	10	11
Boyun uzunluğu (mm)	10	10	10	10	10
Koni çap (mm)	18	18	18	18	18
Koni yükseklik (mm)	5	5	5	5	5
Kalınlık (mm)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

Tablo 3. 6. Koni çapları değişen 3. grup Helmholtz rezonatörleri boyutları

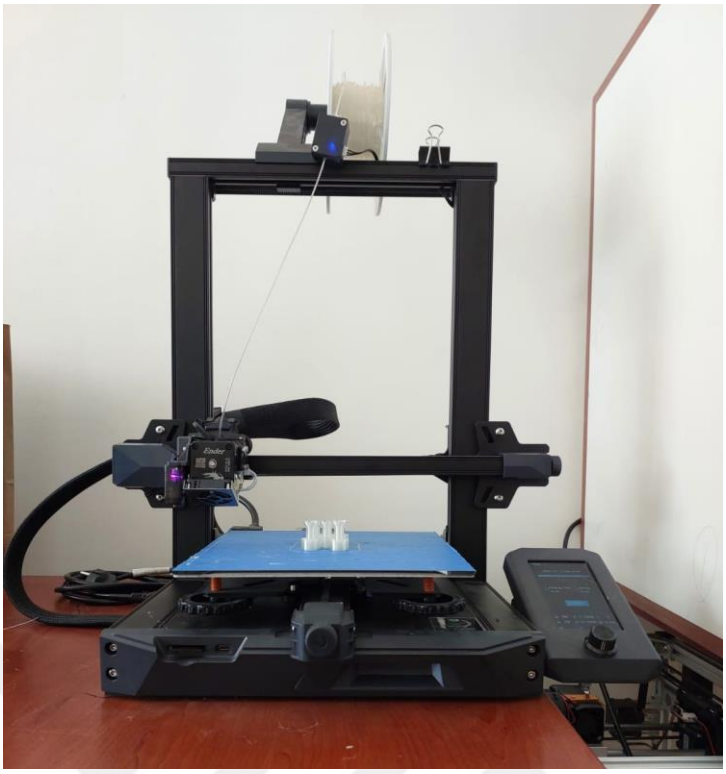
Boyut Bilgisi	K	L	M	N	O
Boşluk Çapı (mm)	18	18	18	18	18
Boşluk yüksekliği (mm)	10	10	10	10	10
Boyun Çapı (mm)	9	9	9	9	9
Boyun uzunluğu (mm)	10	10	10	10	10
Koni çap (mm)	16	17	18	19	20
Koni yükseklik (mm)	5	5	5	5	5
Kalınlık (mm)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

Helmholtz rezonatörlerinin tamamı üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Üretimde kullanılmak üzere seçilen malzeme polilaktik asit (PLA) olmuştur. PLA ticari olarak popüler bir malzemedir. Ayrıca üç boyutlu yazıcıda sorunsuz olarak üretilebilmesi de önemli bir avantajdır. PLA (polilaktik asit) mısır nişastası, şeker kamışı gibi doğal kaynaklardan elde edilmektedir. Geri dönüştürülebilir ve çözünebilir özelliği sayesinde biyolojik uyumluluğu oldukça yüksektir [61]. Tablo 3.7'de deneyde kullanılan PLA malzemesine ait özellikler verilmiştir.

Tablo 3. 7. PLA malzeme özellikleri [61]

Özellikler	**Değerler**
Yoğunluk	$1.24\ g/cm^3$
Çekme dayanımı	43 MPa
Elastisite modülü	3600 MPa
Kopma uzaması	% 2.4
Eğilme dayanımı	105 MPa
Eğilme modülü	4300 MPa
Izod darbe dayanımı	$3\ KJ/m^2$
Camsı geçiş sıcaklığı	65 ℃

Helmholtz rezonatörü üretimi gerçekleştirilen üç boyutlu yazıcı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Üretim için kullanılan üç boyutlu yazıcı Creality marka Ender-3 S1 model numaralı cihazdır. Üretim aşamasında baskı sıcaklığı 200 ℃, tabla sıcaklığı 60 ℃, baskı hızı 50 mm/s gerçekleşmiştir. Katman yüksekliği 0.2 mm'dir. Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'da üretilen rezonatörler değişen parametrelerine göre eklenmiştir. Karıştırılmaması adına her grup, farklı renk filamentlerle üretilmiş olup, bu durumun malzeme özelliklerini değiştirici etkisi bulunmamaktadır.



Şekil 3. 6. Üretim için kullanılan 3 boyutlu yazıcı



Şekil 3. 7. Sırasıyla boyun uzunluğu değişen A, B, C, D, E Helmholtz rezonatörleri



Şekil 3. 8. Sırasıyla boyun çapı değişen F, G, H, I, J Helmholtz rezonatörleri



Şekil 3. 9. Sırasıyla koni çapı değişen K, L, M, N, O Helmholtz rezonatörleri

3.2. Deneysel Yöntemler

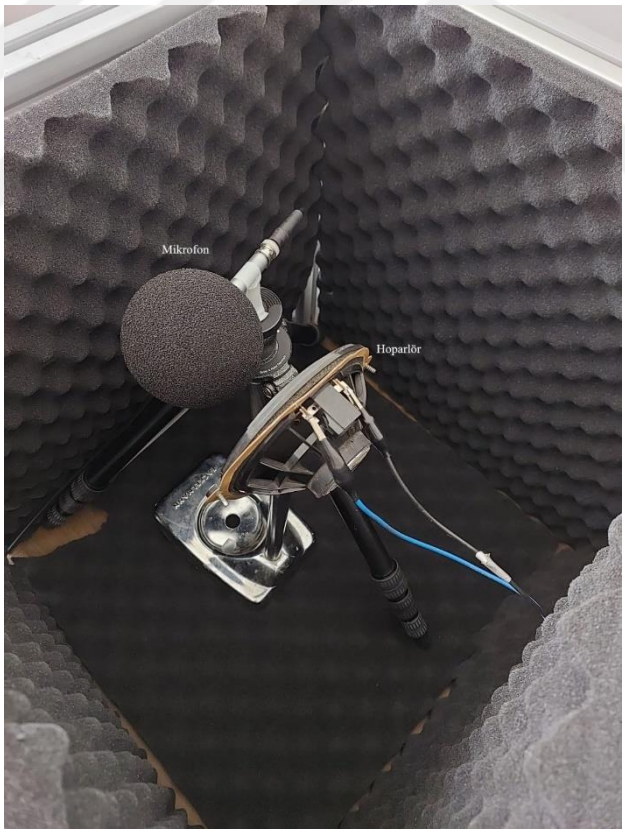
Deneyler dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada hoparlör ses basıncı deneyi yapılarak, hoparlörün belirli frekanslarda oluşturduğu ses basınçlarına bakılmıştır. İkinci aşamada ses basıncı etkisindeki Helmholtz rezonatörlerinin ve plağın frekans-ivme cevaplarına bakılmıştır. Son aşamada ise iki farklı ölçüm yapılmaktadır. Birincisinde ses basınçlarından enerji elde edilmek üzere deneyler gerçekleştirilmiştir. Enerji hasadı deneyi gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak, mikrofon yardımıyla ses basınçları ölçülmüştür. Mikrofon ölçümüyle birlikte deney süreci tamamlanmıştır. Deneylerin bu aşamasında sistemin elde ettiği enerjiler frekans-voltaj grafiklerine dönüştürülmüş ve Helmholtz rezonatörlerinin gürültü azaltıcı etkilerine bakılmıştır. Gürültü azaltıcı etkileri görmek adına tüm Helmholtz rezonatörlerinin frekans-ses basıncı seviyesi cevapları incelenmiştir. Deneylerin tamamı 50 cm x 50 cm x 50 cm ölçülerindeki akustik alan içerisinde gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Hoparlör Ses Basıncı Deneyi

Deneysel çalışmalar ilk olarak hoparlörün frekansa karşılık tepkisini belirlemek üzere yapılmıştır. Deneyde 1 Hz ile 3000 Hz arasında belirli frekanslar uygulanarak ses basıncı seviyeleri ölçülmüştür. Oluşturulan deney ortamı Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 10. Hoparlör ses basıncı deneyi dış görünüm



Şekil 3. 11. Hoparlör ses basıncı deneyi iç görünüm

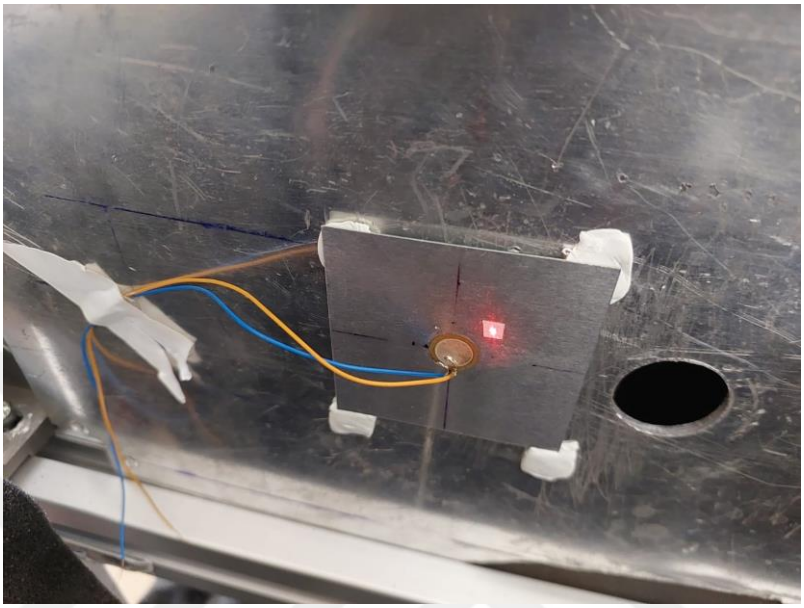
Deney düzeneği oluşturulurken mikrofon ve hoparlör arası mesafe 70 mm olarak ayarlanmıştır. Deneylerin kalan aşamalarında da hoparlör ve deney düzenekleri arasında 70 mm mesafe uygulanmıştır. Ses dalgalarının deney düzeneklerine doğrudan gelebilmesi için, merkezlerin aynı hizada olmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca mikro ölçekte çalışmalar olmasından dolayı mesafelerin az tutulmasına dikkat edilmiştir.

Deneylerin frekans ayarlarını düzenlemek üzere Rigol DG-10200-A model sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Oluşturulan sinyallerin yükseltilmesi için Linear Amplifier EPA-104 model amplifikatör (yükselteç) kullanılmıştır. Amplifikatör, yükseltilen sinyaller ile ses basıncı oluşturmak amacıyla Powermaster marka hoparlöre bağlanmıştır. Hoparlörlerden oluşan ses basınçları Brüel & Kjaer-4189-A021 marka mikrofon ile ölçülmüştür ve Brüel & Kjaer-3050-B-040 marka veri alıcıya iletilmiştir. Veri alıcıdaki bu değerler ise bilgisayar yardımıyla, Pulse LabShop yazılımı ile görüntülenmiştir.

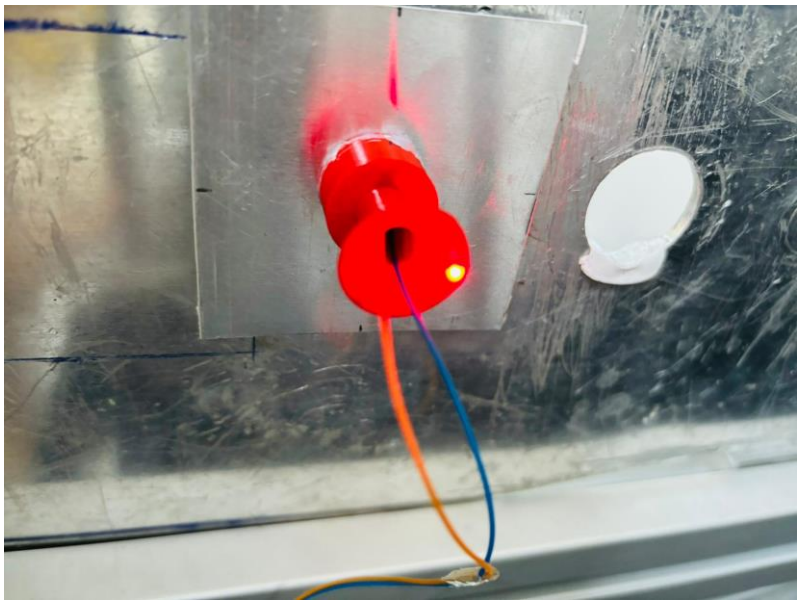
3.2.2. Plak ve Rezonatörün Frekans-İvme Deneyi

Deneylerin ikinci aşamasında akustik ses basıncı etkisi altındaki plakların ve tasarlanan Helmholtz rezonatörlerinin üzerinde oluşan frekans ve ivme değerlerine bakılmıştır. Bu deneyde hoparlör sırasıyla; Linear Amplifier Model EPA-104 markalı amplifikatöre ve Rigol DG-10200-A marka sinyal jeneratörüne bağlıdır. Hoparlöre frekans, sinyal jeneratörü aracılığıyla 1 Hz-3200 Hz aralığında 60 saniye boyunca süpürme şeklinde uygulanmaktadır. Titreşim fonksiyonunun genliği 90 volta amplifikatör ile yükseltilmektedir. Ses dalgaları prototipe doğrudan etki ederken, lazer vibrometre kullanılarak hem plak üzerinden hem de Helmholtz rezonatörleri üzerinde lazer odaklanarak frekans-ivme ölçümleri yapılmıştır. Tüm Helmholtz rezonatörleri için aynı bölgeden ivme ölçümü yapılmasına özen gösterilmiştir. Ölçüm için Ometron-VQ-400-A marka lazer vibrometre kullanılmıştır. Lazer vibrometre analog olarak deplasman/hız/ivme değerlerini okumaktadır. Bu veriler, Brüel&Kjaer-3050-B-040 marka veri toplayıcısında işlenerek dijital çıktılar elde edilmektedir. Her bir örneğe ait frekans-ivme grafikleri elde edilmiştir.

Ölçülen bu değerler veri alıcısına iletilip, daha sonra bilgisayar yardımıyla ivme-frekans grafiklerine dönüştürülmüştür. Şekil 3.12 ve 3.13'te gerçekleştirilen deney görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 3. 12. İvme ölçümü iç görünüm boş plak



Şekil 3. 13. İvme ölçümü iç görünüm Helmholtz rezonatörü

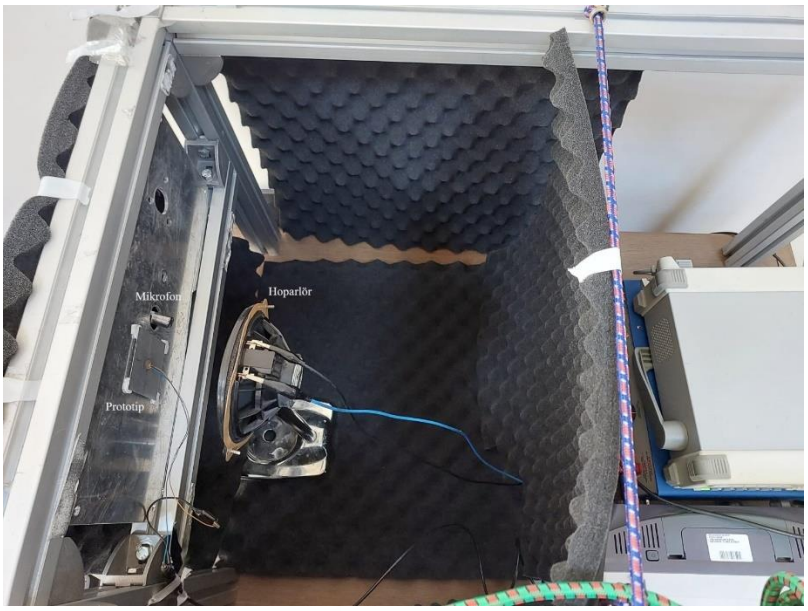
Çalışmanın bu bölümünde 15 Helmholtz rezonatörü ve bir boş plak olmak üzere, toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Voltaj Farkı Ölçümü

Deneylerin üçüncü aşamasında, akustik enerji kullanılarak enerji hasadı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan alüminyum plak, piezoelektrik disk ve üretilen Helmholtz rezonatörleri ile akustik enerji hasadı deneyleri gerçekleştirilmiştir. 15 farklı HR ve bir HR'siz olmak üzere toplam 16 deney yapılmıştır. Oluşturulan deney ortamında hoparlör ve HR'lerin merkezleri karşı karşıya gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Alüminyum plak ise arkasındaki sabitlenmiş levhaya kauçuk destek elemanlar ile elastik bir şekilde sabitlenmiştir. Oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.14 ve 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 14. Akustik enerji hasadı deney düzeneği dış görünüm



Şekil 3. 15. Akustik enerji hasadı deney düzeneği iç görünüm

Deneyin bu bölümünde tasarlanan prototiplerle birlikte, ek olarak voltaj çıktılarını ölçmek adına AAtech Ads-1022b marka osiloskop cihazı kullanılmıştır. Osiloskop, elektriksel sinyalleri grafiksel olarak görüntüleyen ve bu sinyallerin zaman içinde nasıl değiştiğini gösteren bir araçtır. Mekanik basınca maruz kalan piezoelektrik malzemeden elde edilen elektrik sinyalleri, osiloskop yardımıyla voltaj dalga formları olarak görüntülenebilmektedir.

Deneyin işleyiş süreci sinyal jeneratöründen frekans aralığının belirlenmesiyle başlamaktadır. Rigol DG-10200-A marka sinyal jeneratörü kullanılarak 1 Hz'den 3000 Hz'e kadar bir dakika süresince sinyal taraması gerçekleştirilmiştir. Bu sinyaller sonrasında Linear Amplifier Model EPA-104 markalı amplifikatör yardımıyla 90 volta yükseltilmiş ve bağlı olan Powermaster marka hoparlöre iletilmiştir. Hoparlörden aldığı ses basınçları piezoelektrik disk üzerinde titreşim oluşturdukça elde edilen elektrik sinyalleri, bağlı olduğu AAtech Ads-1022b marka osiloskop yardımıyla zamana bağlı voltaj değişimi ölçülmektedir. Sonrasında zamana bağlı değişen voltaj değerleri, Matlab R2016a programı kullanılarak frekansa bağlı değişimi incelenmiştir. Tasarımı yapılan tüm prototipler için toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Mikrofon Ses Basıncı Ölçümü

Rigol DG-10200-A marka sinyal jeneratörü kullanılarak 1 Hz'den 3000 Hz'e 1 dakika boyunca frekans süpürme işlemi uygulanmıştır. Sinyaller Linear Amplifier Model EPA-104 markalı amplifikatör kullanılarak 90 volta kadar yükseltilmiş ve amplifikatör hoparlöre bağlanmıştır. Hoparlörden çıkan ses basınçları piezoelektrik disk ve plak üzerinde titreşime neden olurken, diğer yandan prototipin yanında bulunan Brüel&Kjaer-4189-A021 marka mikrofon ile ses basıncı ölçülmektedir. Mikrofonun yapmış olduğu ölçümler dijital sinyallere dönüştürülerek, Brüel&Kjaer-3050-B-040 marka veri alıcısına iletilmektedir. Veri alıcısına kaydedilen sonuçlar Pulse LabShop yazılımı yardımıyla, frekans-ses basıncı seviyesi cevap fonksiyonu olarak görüntülenmektedir. Şekil 3.16'da deney düzeneği yakından gösterilmektedir.



Şekil 3. 16. Mikrofon ölçüm deney düzeneği

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Üç Boyutlu Yazıcıda Üretilen Rezonatörlerin Boyutlandırılması

Helmholtz rezonatörlerinin üretimi üç boyutlu yazıcı ile yapılmıştır. Üretim aşaması yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden dolayı, tasarlanan prototipler ile üretimden sonra elde edilen prototipler arasında farklılıklar olabilmektedir. Üretim metodundaki yüksek sıcaklık girdisi nedeniyle oluşan milimetrik farklılıkların gözlemlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle üretim sonrasında elde edilen Helmholtz rezonatörleri kumpas kullanılarak tekrar ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4. 1. Üretilen Helmholtz rezonatörlerinin tasarım ve gerçek boyutları

Grup	Numune	Üretim ve Tasarım	Boşluk çap (mm)	Boşluk kalınlık (mm)	Boyun çap (mm)	Boyun kalınlık (mm)	Koni çap (mm)	Koni kalınlık (mm)
1. Grup	A	Üretim	18.10	1.40	9.05	1.30	17.55	1.30
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20
	B	Üretim	18.30	1.53	9.00	1.30	17.50	1.00
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20
	C	Üretim	18.00	1.35	9.00	1.35	17.30	1.00
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20
	D	Üretim	17.95	1.33	9.00	1.33	17.55	1.00
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20
	E	Üretim	18.00	1.30	9.00	1.30	17.45	1.05
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20
2. Grup	F	Üretim	17.95	1.28	7.10	1.38	17.55	1.20
		Tasarım	18.00	1.20	7.00	1.20	18.00	1.20
	G	Üretim	18.00	1.38	7.95	1.28	17.50	1.10
		Tasarım	18.00	1.20	8.00	1.20	18.00	1.20
	H	Üretim	17.90	1.28	9.00	1.30	17.55	0.95
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20

	I	Üretim	17.85	1.30	10.00	1.33	17.50	1.00
		Tasarım	18.00	1.20	10.00	1.20	18.00	1.20
	J	Üretim	18.00	1.30	11.15	1.43	17.50	1.10
		Tasarım	18.00	1.20	11.00	1.20	18.00	1.20
3. Grup	K	Üretim	17.85	1.28	9.00	1.30	15.70	1.10
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	16.00	1.20
	L	Üretim	17.95	1.30	9.00	1.33	16.60	1.00
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	17.00	1.20
	M	Üretim	18.10	1.45	9.00	1.33	17.55	1.00
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	18.00	1.20
	N	Üretim	18.20	1.45	8.95	1.30	18.45	0.95
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	19.00	1.20
	O	Üretim	17.95	1.30	9.05	1.35	19.50	0.95
		Tasarım	18.00	1.20	9.00	1.20	20.00	1.20

Tablodaki veriler incelendiğinde ve üretim değerleriyle tasarım değerleri karşılaştırıldığında, farklılıklar olduğu göze çarpmaktadır. Burada Helmholtz rezonatörlerinin her biri kendi tasarımlarıyla karşılaştırılmaktadır. Üretim aşamasında oluşan farklılıklar, mutlak değerce yüzdesel olarak hesaplanmıştır ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4. 2. Üretim aşamasında oluşan farklılıkların yüzdesel değeri

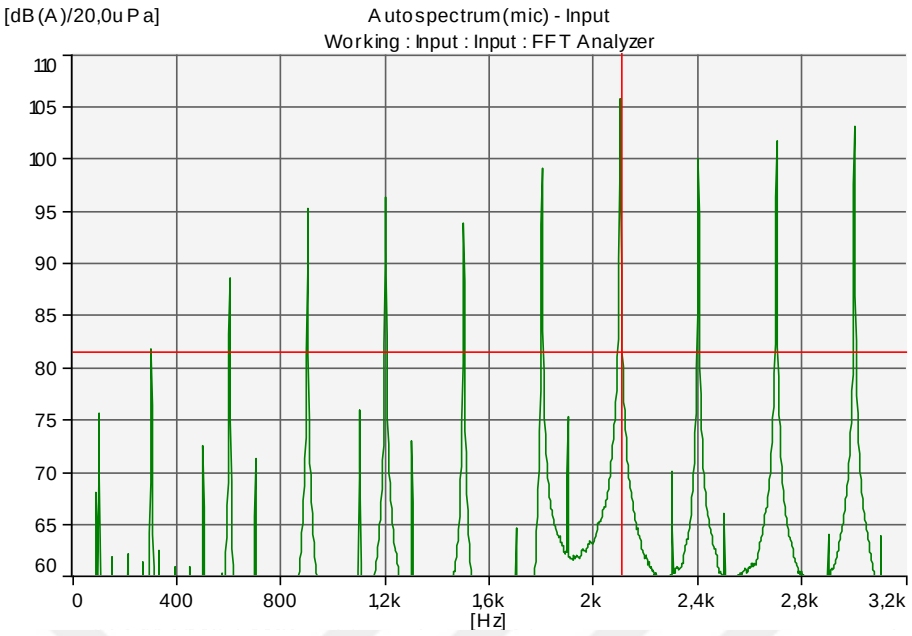
Grup	**Numune**	**Boşluk çap (%)**	**Boşluk kalınlık (%)**	**Boyun çap (%)**	**Boyun kalınlık (%)**	**Koni çap (%)**	**Koni kalınlık (%)**
1. Grup	A	0.56	16.17	0.56	8.33	2.50	8.33
	B	1.67	27.08	0	8.33	2.78	16.67
	C	0	12.50	0	12.50	3.89	16.67
	D	0.28	10.42	0	10.42	2.50	16.67
	E	0	8.33	0	8.33	3.06	12.50
2. Grup	F	0.28	6.25	1.43	14.58	2.50	0
	G	0.00	14.58	0.62	6.25	2.78	8.33

	H	0.56	6.25	0	8.33	2.50	20.83
	I	0.83	8.33	0	10.42	2.78	16.67
	J	0	8.33	1.36	18.75	2.78	8.33
3. Grup	K	0.83	6.25	0	8.33	1.88	8.33
	L	0.28	8.33	0	10.42	2.35	16.67
	M	0.56	20.83	0	10.42	2.50	16.67
	N	1.11	20.83	0.56	8.33	2.89	20.83
	O	0.28	8.33	0.56	12.50	2.50	20.83

Tasarım ve üretim aşamasında oluşan farklılık Tablo 4.2'de daha net bir şekilde görülmektedir. Özellikle ince prototipler olması nedeniyle, kalınlıklardaki yüzdesel farklar yüksek değerleri görmektedir. Tasarlanan ve üretilen prototipler arasında oluşan en yüksek farkın %27.08 olduğu görülmektedir.

4.2. Hoparlör Ses Basıncı Deneyi Araştırma Sonuçları

Belirlenen frekanslarda ölçülen ses basıncı seviyeleri incelenmiştir. Frekansa karşılık gelen ses basıncı seviyeleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu grafikte bazı frekans değerlerinde (100 Hz, 300 Hz, 600 Hz, 900 Hz, 1200 Hz, 1500 Hz, 1800 Hz, 2100 Hz, 2400 Hz, 2700 Hz, 3000 Hz) ses basıncı yükselmektedir. Frekans değerlerine karşılık elde edilen ses basıncı seviyesi Tablo 4.3'te bulunmaktadır. Frekans arttıkça ses basıncı seviyesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 1. Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği

Tablo 4. 3. Frekansa karşılık gelen ses basıncı seviyesi değerleri

Frekans (Hz)	**Ses Basıncı Seviyesi (dB)**
3000	103.19
2700	101.81
2400	100.13
2100	106.02
1800	99.37
1500	94.02
1200	96.46
900	95.39
600	88.51
300	82.01
100	75.75

4.3. Plak ve Rezonatörlerin Frekans-İvme Deneyi Sonuçları

Gerçekleştirilen bu deney çalışması ile boş plak ve plağa bağlı 15 Helmholtz rezonatörü üzerinden, lazer vibrometre kullanılarak frekans cevapları ölçülmüştür. Ölçülen cevaplar frekans-ivme grafiği olarak paylaşılmıştır. Şekil 4.2'de Helmholtz rezonatörü bulunmayan sistemin frekans-ivme grafiği verilmiştir. Plak, akustik basıncın neden olduğu bazı titreşim frekanslarında yüksek ivme tepkisi vermektedir. Bu frekanslar plağın rezonans frekanslarına karşılık gelmektedir. 1900 Hz bölgesinde plağın maksimum ivmeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Grafikten belirlediğimiz plağın bazı rezonans frekansları; 8 Hz, 118 Hz, 210 Hz, 312 Hz, 362 Hz, 528 Hz, 612 Hz, 942 Hz şeklindedir.

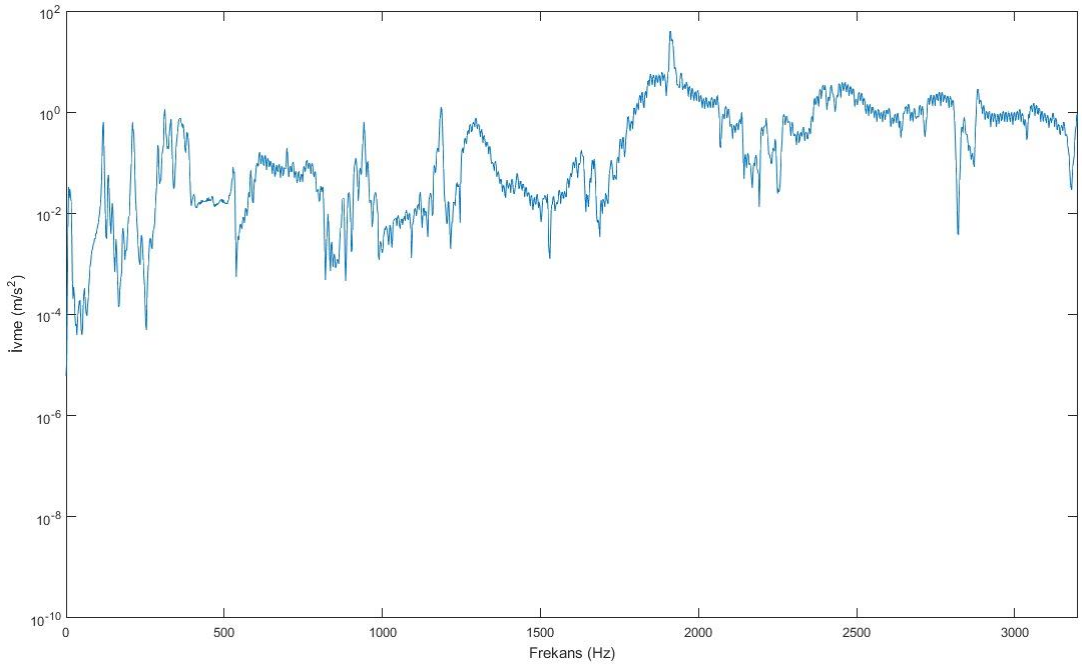
Tüm rezonatörler plak üzerine sabitlenerek, her biri üzerinden frekans-ivme ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.3'te tüm Helmholtz rezonatörleri üzerinden ölçülen frekans-ivme grafikleri verilmiştir. Üretilen bütün Helmholtz rezonatörlerinin yakın frekanslarda yüksek ivme cevapları verdiği gözlemlenmektedir. Helmholtz rezonatörleri direkt olarak plağa rijit bağlı olduğundan, rezonatör üzerinden okunan bazı frekans-ivme tepkilerinin plağın tepkileriyle çakışmaktadır. Plağın ve plağa bağlı rezonatörlerin ivme grafiklerinde oluşan bazı pikler, ortak rezonans bölgelerine sahip olduklarını göstermektedir. Tablo 4.4'te 1 Hz ile 1000 Hz arasındaki bazı rezonans frekansları belirtilmiştir. Helmholtz rezonatörlerinin gruplar halindeki frekans-ivme grafikleri de ayrıca verilmiştir. Şekil 4.4'te boyun uzunluğu değişen 1. grup rezonatörler bulunmaktadır. Elde edilen grafik incelendiğinde ivmelerin artışa geçtiği dört frekans bölgesi göze çarpmaktadır. Bu bölgeler 1-400 Hz, 800-1000 Hz, 1975-2410 Hz ve 2780-3200 Hz olarak ayrılmaktadır. İlk bölgede en yüksek ivme 375 Hz'de 0.3651 $\mathrm{m/s^2}$ ile üçüncü en uzun boyna sahip C rezonatöründe görülmektedir. İkinci bölgede en yüksek ivme 970 Hz'de 0.3718 $\mathrm{m/s^2}$ ile en uzun boyunlu E rezonatöründe gerçekleşmiştir. Üçüncü bölgede en yüksek ivme değeri 1988 Hz ve 0.4172 $\mathrm{m/s^2}$ ile ikinci uzun boyunlu D Helmholtz'unda gerçekleşmiştir. Son bölgede ise en yüksek ivme değeri yine D Helmholtz'unda, 3197 Hz'de 4.66 $\mathrm{m/s^2}$ olarak görülmektedir. Şekil 4.5'te boyun çapı değişen 2. grup rezonatörlerin frekans-ivme grafiği bulunmaktadır. Bu grafiğe bakıldığında birinci frekans bölgesinde en yüksek ivmenin 270 Hz'de ve 0.5635 $\mathrm{m/s^2}$ ile en yüksek üçüncü boyun çapına sahip H rezonatöründe gerçekleştiği görülmektedir. İkinci bölgede en yüksek ivme yine H rezonatöründe, 922

Hz'de ve 0.1692 m/s^2 değerindedir. Üçüncü bölge incelendiğinde ikinci en yüksek boyun çapına sahip I rezonatöründe ve 2208 Hz'de, 0.4342 m/s^2 ile en yüksek ivme değeri görülmektedir. Son frekans bölgesinde, tekrar I rezonatörünün en yüksek ivme değerini aldığı görülmektedir. Bu değer 3089 Hz'de 3.408 m/s^2 olarak ölçülmüştür. Son olarak Şekil 4.6'da ise koni çapı değişen 3. grup rezonatörlerin frekans-ivme grafiği verilmiştir. Birinci bölgede en yüksek ivme değerinin 272 Hz'de 0.3995 m/s^2 olarak, en düşük koni çapına sahip K rezonatöründe olduğu görülmektedir. Birinci frekans bölgesi ve ikinci frekans bölgesi arasında K rezonatöründe yüksek ivme değerine sahip bir pik daha oluşmaktadır. Bu nokta 566 Hz'e karşılık 0.6314 m/s^2 ivme değerine denk gelmektedir. İkinci bölgede oluşan en yüksek ivme değeri ikinci en büyük koni çapına sahip olan N Helmholtz'unda ve 972 Hz'de, 0.3705 m/s^2 olduğu görülmektedir. Üçüncü frekans bölgesinde 2064 Hz'de 0.3125 m/s^2 ve dördüncü frekans bölgesinde 3027 Hz'de 4.063 m/s^2 ivme değerleriyle, en yüksek ölçümler tekrar N rezonatöründe gerçekleşmiştir.

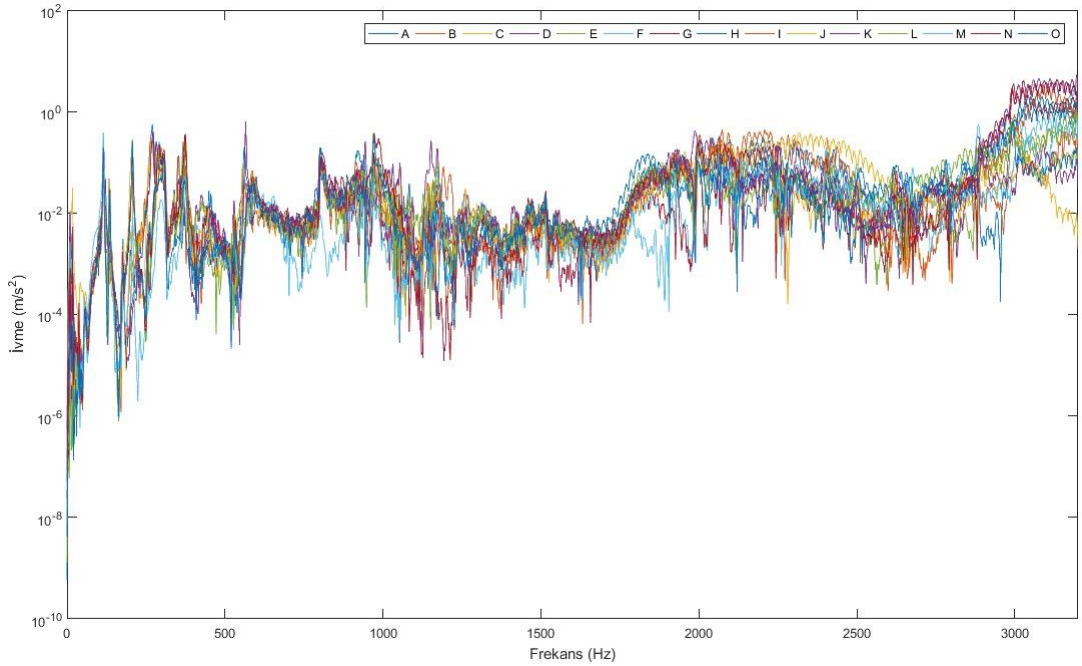
Tablo 4. 4. Plağın ve plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin (HR) seçili rezonans frekansları (Hz)

	1	2	3	4	5	6	7	8
Plak	8	118	210	312	362	528	612	942
A Helmholtz	10	116	176	270	382	441	557	801
B Helmholtz	9	115	205	295	376	525	586	810
C Helmholtz	17	115	202	294	375	534	587	808
D Helmholtz	9	115	206	291	369	529	587	801
E Helmholtz	11	115	206	288	368	531	584	804
F Helmholtz	11	115	207	292	373	534	589	804
G Helmholtz	9	115	207	289	374	534	587	808
H Helmholtz	10	116	177	270	353	449	562	804
I Helmholtz	9	116	177	264	298	351	560	804
J Helmholtz	10	116	176	267	286	351	556	804
K Helmholtz	9	116	176	272	282	354	566	804
L Helmholtz	11	115	207	292	372	521	590	803
M Helmholtz	10	115	207	298	375	533	586	802

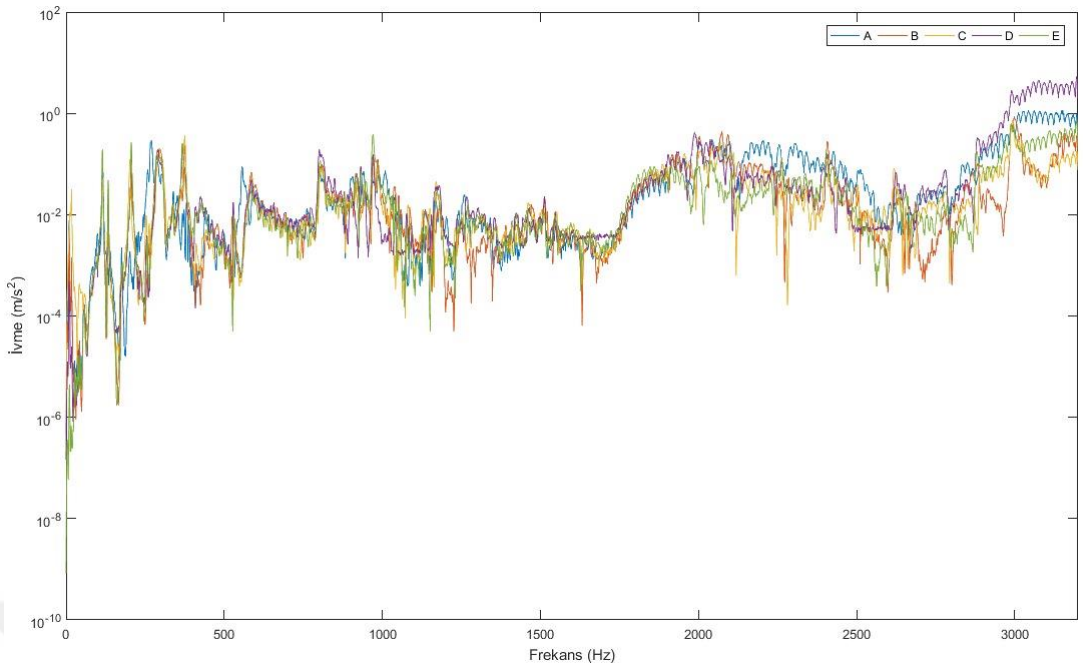
N Helmholtz	10	115	207	292	373	534	587	804
O Helmholtz	10	115	207	306	373	534	577	803



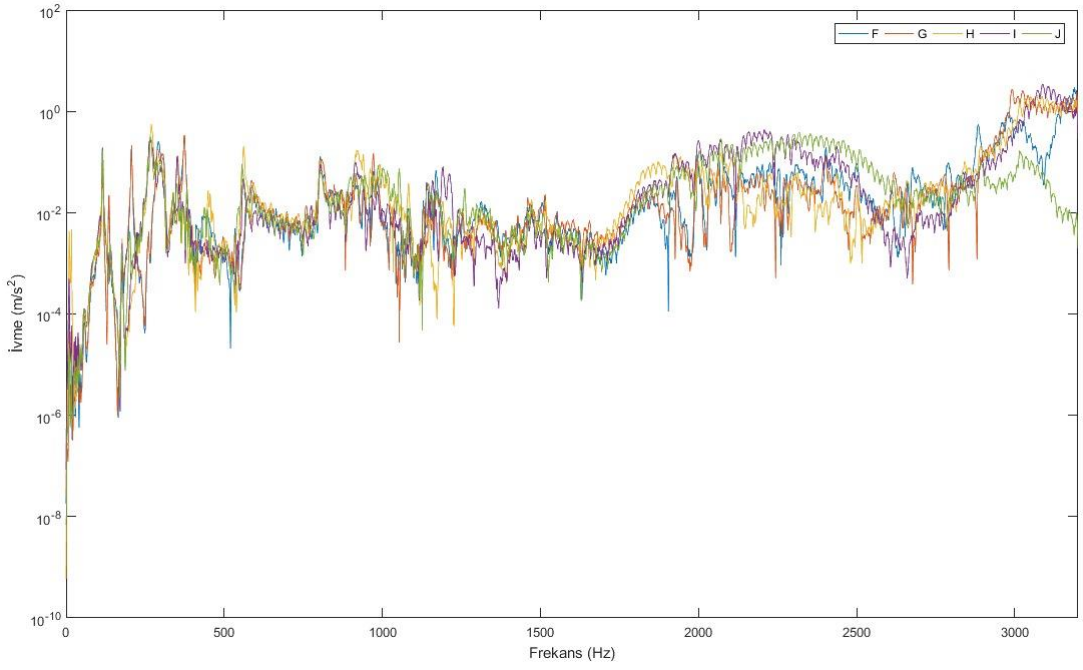
Şekil 4. 2. Helmholtz rezonatörü bulunmayan sistemin Frekans-İvme grafiği



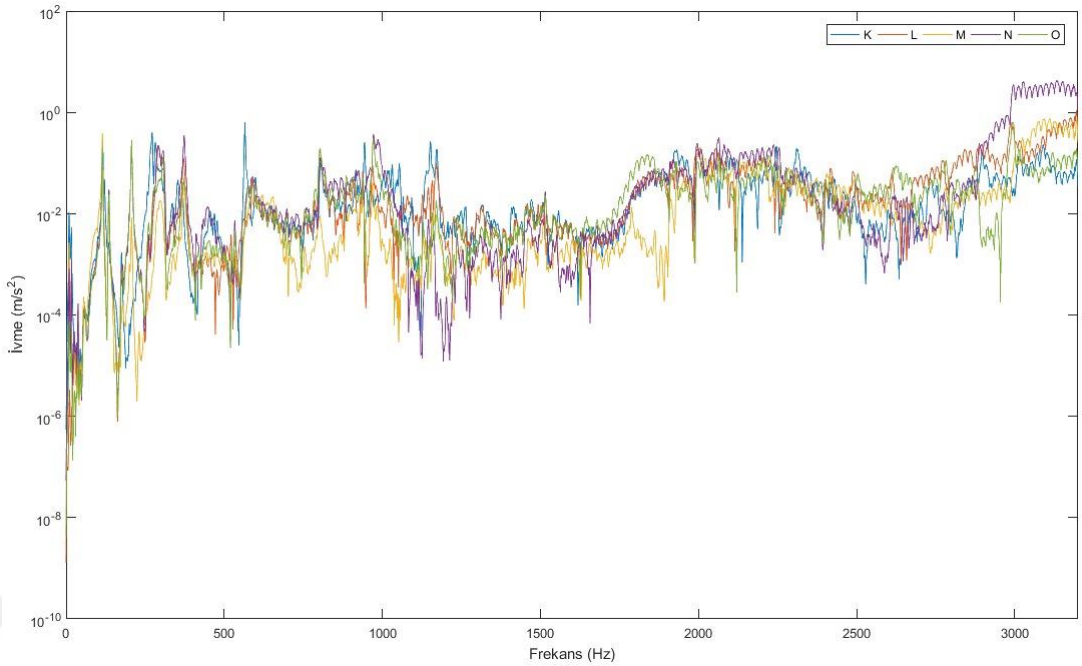
Şekil 4. 3. Plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği



Şekil 4. 4. Boyun uzunluğu değişen plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği



Şekil 4. 5. Boyun çapı değişen plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği



Şekil 4. 6. Koni çapı değişen plağa bağlı Helmholtz rezonatörlerinin Frekans-İvme grafiği

4.4. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Voltaj Farkı Ölçüm Sonuçları

Akustik enerji hasadı deneyinde, 1 Hz'den 3000 Hz'e kadar bir dakika boyunca, frekans taraması ile prototip üzerine ses basıncı uygulanmıştır. Akustik ses basıncı etkisi altında titreşim yapan plak, üzerine rijit bağlı piezoelektrik disk titreşim etkisi ile şekil değiştirmekte ve böylece üzerinde voltaj farkı oluşmaktadır. Piezoelektrik diske bağlanan osiloskop ile elde edilen voltaj değerleri ölçülmüştür. Her deney prototipi için, saniyede bir voltaj değerleri alınmıştır. Altmış saniye frekans taraması yapıldığı için saniye başına 50 Hz'lik artış denk gelmektedir. Bu nedenle ölçülen her voltaj değeri 50 Hz ve katlarından oluşmaktadır. Şekil 4.7'de Helmholtz rezonatörlerinin ve boş plağın enerji hasatları Boyutlu Voltaj (mV)-Frekans (Hz) grafiği şeklinde verilmiştir. Tüm deneylerde en yüksek enerji hasadı 50-200 Hz aralığında 166 mV ile M rezonatörlü sistem tarafından gerçekleştirilmiştir. Aynı bölgede rezonatörsüz plakta ise 46 mV ölçüm yapılmıştır.

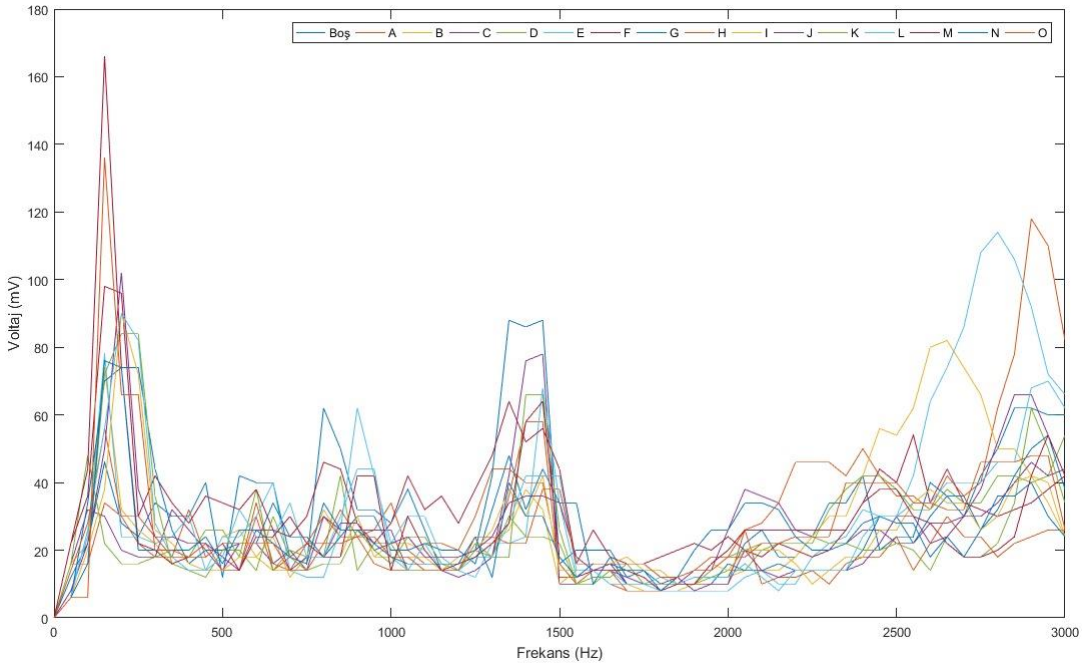
Daha sonra her bir prototip üzerinde ölçülen voltaj değerlerinin karşılaştırılabilmesi için voltaj değerlerine boyutsuzlaştırma işlemi uygulanmıştır.

Boyutsuzlaştırma işlemi, her parametre grubu için ayrı olarak hazırlanmıştır. Bu işlemi gerçekleştirirken her grubun en küçük voltaj değeri grubun tüm voltaj değerlerinden çıkarıldıktan sonra çıkan sonuçlar, grubun en yüksek voltaj değerine bölünmüştür. Böylece değerleri 0-1 aralığında değişen boyutsuz voltaj verileri elde edilmiştir. Şekil 4.8'de Helmholtz rezonatörsüz sistem ve boyun uzunlukları değişen 1. grup Helmholtz rezonatörlerinin bulunduğu Frekans (Hz)-Boyutsuz voltaj grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte 50-200 Hz, 750-1000 Hz, 1250-1500 Hz ve 2550-3000 Hz frekans aralıklarındaki dört akustik rezonans bölgesinde, voltaj değerlerinde sıçramalar olduğu görülmektedir. İlk frekans bölgesi Bölüm 4.3'te elde edilen Şekil 4.2'de görülen grafikteki plağın rezonans frekansına karşılık gelmektedir. Bu bölgede en yüksek boyun uzunluğuna sahip E kodlu Helmholtz rezonatörünün en fazla enerji hasadı gerçekleştiren rezonatör olduğu görülmektedir. Birinci frekans bölgesi için enerji hasatları şu şekilde sıralanmaktadır; ikinci en yüksek hasat dördüncü uzun boyunlu B Helmholtz'ta, üçüncü en yüksek hasat ikinci uzun boyunlu D Helmholtz'ta, son üç sistem çok yakın olmakla birlikte sırasıyla boş plak, en kısa boylu A Helmholtz ve C Helmholtz'tur. İkinci frekans bölgesinde de en yüksek voltaj değeri en uzun boyunlu E kodlu Helmholtz rezonatörü ve boş plakta elde edilmiştir. Bölüm 4.3'teki şekil 4.2 ve 4.4 incelendiğinde en yüksek ivme değerleri de bu iki sistemde bulunmaktadır. Diğer Helmholtz rezonatörleri ise bu bölgede birbirlerine çok yakın enerji hasadı gerçekleştirmişler. Üçüncü frekans bölgesinde en yüksek enerji hasadının boş plakta olduğu görülmektedir. Rezonatörlerde ise en yüksek hasat üçüncü uzun boyunlu C Helmholtz'u gerçekleştirmiştir. İkinci ve üçüncü sırada en uzun boyunlu E ve ikinci uzun boyunlu D Helmholtz'u bulunmaktadır. En kısa boyunlu A rezonatörü ve ikinci kısa boyunlu B rezonatörü bu bölgedeki enerji hasadında sırasıyla beşinci ve altıncı olmuşlardır. Dördüncü frekans bölgesinde ise en yüksek enerji hasatları gerçekleşmiştir. En küçük boyun uzunluğuna sahip A kodlu Helmholtz rezonatörünün elde ettiği voltaj, 2850-2900 Hz arasında en yüksek olduğu görülmektedir. En uzun boyunlu E rezonatörünün enerji hasadı, A rezonatörüne oldukça yakın olduğu görülmektedir. Diğer sistemler de sırasıyla; ikinci kısa boyuna sahip B rezonatörü, üçüncü kısa boyuna sahip C rezonatörü, rezonatörsüz boş plak, dördüncü kısa boyuna sahip D rezonatörü enerji hasatlarını gerçekleştirmiştir.

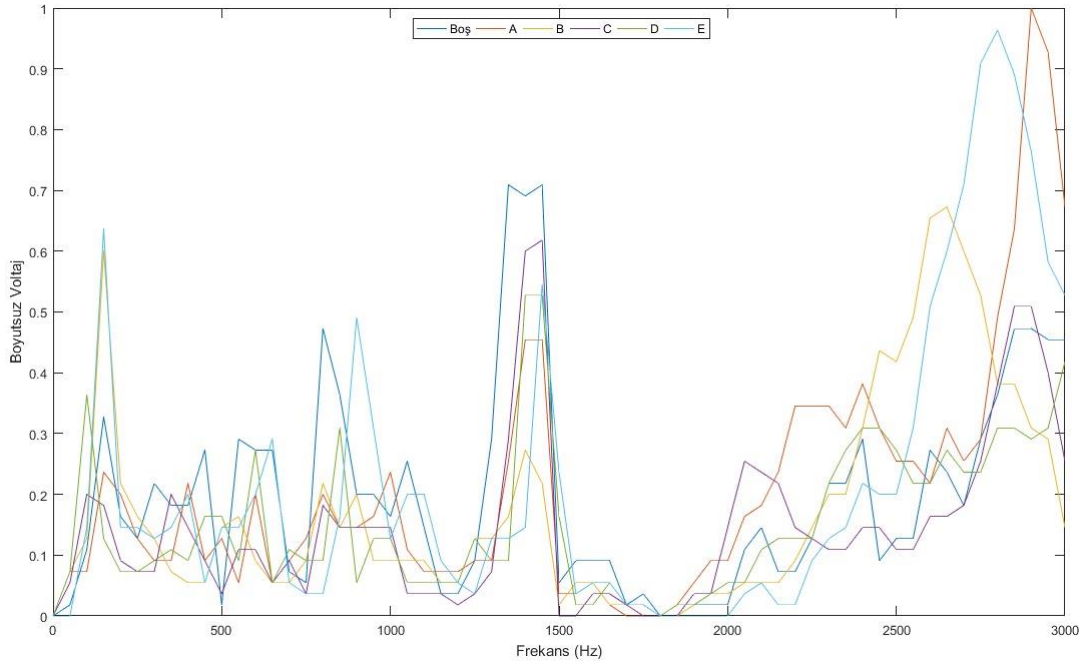
Şekil 4.9'da boyun çapları değişen 2. grup Helmholtz rezonatörleri ve rezonatörsüz sistem grafik üzerinde verilmiştir. Bu grafikteki sonuçları da dört ayrı

frekans aralığında incelemek mümkündür. Birinci frekans bölgesi 50-250 Hz aralığında en yüksek voltaj, en geniş boyun çapına sahip J Helmholtz rezonatörüne sahip sistemde elde edilmiştir. Yine bu bölge Bölüm 4.3'te elde edilen Şekil 4.2'de görülen grafikteki plağın rezonans frekansına karşılık gelmektedir. En yüksek ikinci ve üçüncü enerji hasadını gerçekleştiren rezonatörler sırasıyla, en büyük ikinci boyun çapına sahip I ve en küçük boyun çapına sahip F olmuştur. En küçük ikinci boyun çapına sahip G rezonatörü dördüncü, üçüncü büyük boyun çapına sahip rezonatör olan H beşinci yüksek hasadı gerçekleştirmişlerdir. Boş plakta ise en az enerji hasadı gerçekleşmiştir. İkinci ve üçüncü frekans bölgelerinde en yüksek voltaj değerinin boş plakta olduğu görülmektedir. İki bölgede de enerji hasadı sıralamasının aynı olduğu gözlemlenmektedir. Boş plaktan sonra en yüksek hasatlar sırasıyla, en küçük boyun çapına sahip F, ikinci en küçük boyun çapına sahip G, ortanca boyun çaplı H, ikinci büyük boyun çapına sahip I ve en büyük boyun çapına sahip J şeklinde gerçekleşmiştir. Son frekans bölgesinde ise en küçük ikinci boyun çapına sahip olan G kodlu Helmholtz sistemi en yüksek enerji hasadını gerçekleştiren prototip olmuştur. İkinci en yüksek hasat ise boş plakta gerçekleşmiştir. Diğer en yüksek enerji hasatları ise sırasıyla; üçüncü sırada en büyük boyun çapına sahip J, ikinci en büyük boyun çapına sahip I, en küçük boyun çapına sahip F ve ona çok yakın olan ortanca boyun çapına sahip H rezonatörü bulunan sistem tarafından gerçekleştirilmiştir.

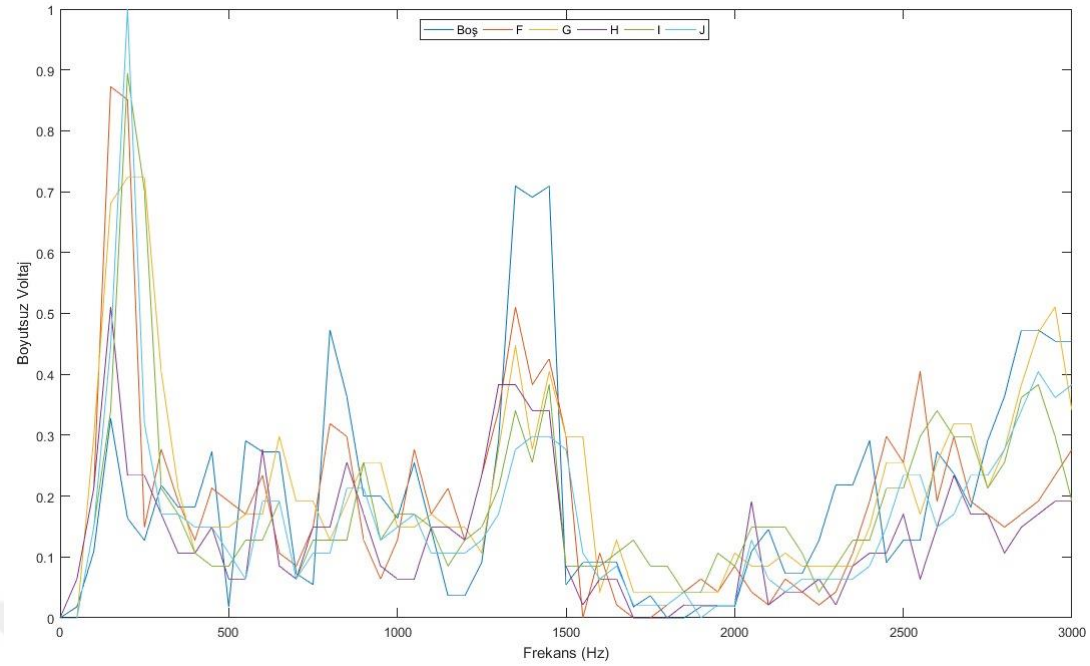
Şekil 4.10'da koni çapları değişen 3. Grup Helmholtz rezonatörlerinin bulunduğu grafik verilmiştir. Yine grafikteki sonuçlar dört ayrı frekans aralığında incelenmekte ve rezonatörlü sistemlerin 50-250 Hz aralığında en yüksek enerji kazanımları olduğu belli olmaktadır. En büyük üçüncü koni çapı büyüklüğüne sahip M kodlu Helmholtz rezonatörünün bulunduğu prototip, en yüksek voltaj değerine sahiptir. Bu bölge Bölüm 4.3'te elde edilen Şekil 4.2'deki plağın rezonans bölgesine denk gelmektedir. İkinci yüksek enerji kazanımı en yüksek koni çapına sahip O rezonatörlü sistem, üçüncü yüksek kazanım ise ikinci küçük koni çapına sahip L rezonatörlü sistemde gerçekleşmiştir. Dördüncü yüksek enerji hasadı en küçük koni çaplı K rezonatörü, beşinci yüksek enerji hasadı ikinci büyük koni çapına sahip N rezonatörü bulunan sistemde gerçekleşmiştir. Rezonatörsüz boş plak bulunan sistem ise bu bölgenin en az enerji kazanımı sağlayan sistem olmaktadır. İkinci, üçüncü ve dördüncü frekans bölgelerindeki rezonatörlü sistemlerin enerji kazanımları, boş sisteme göre düşük çıkmıştır.



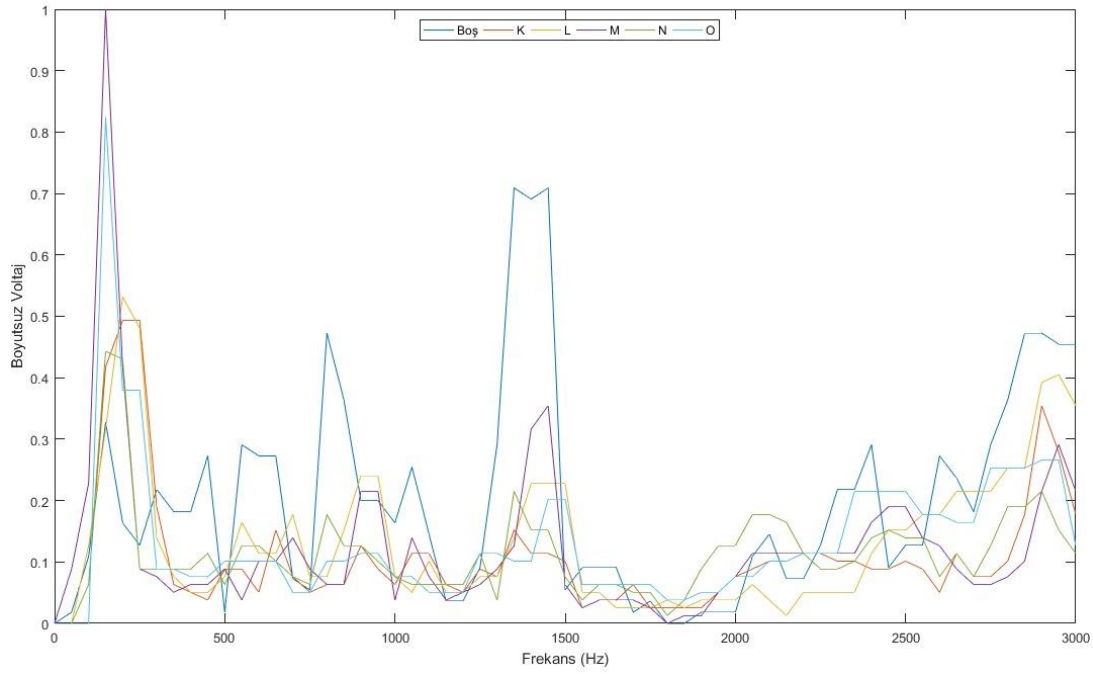
Şekil 4. 7. Boyutlu Voltaj (mV)-Frekans (Hz) grafiği



Şekil 4. 8. Rezonatörsüz ve boyun uzunlukları değişen Helmholtz rezonatörlü sistemlerin Frekans (Hz)-Boyutsuz Voltaj grafiği



Şekil 4. 9. Rezonatörsüz ve boyun çapları değişen Helmholtz rezonatörlü sistemlerin Frekans (Hz)-Boyutsuz Voltaj grafiği



Şekil 4. 10. Rezonatörsüz ve koni çapları değişen Helmholtz rezonatörlü sistemlerin Frekans (Hz)-Boyutsuz Voltaj grafiği

4.5. Akustik Enerji Hasadı Deneyi-Mikrofon Ses Basıncı Ölçüm Sonuçları

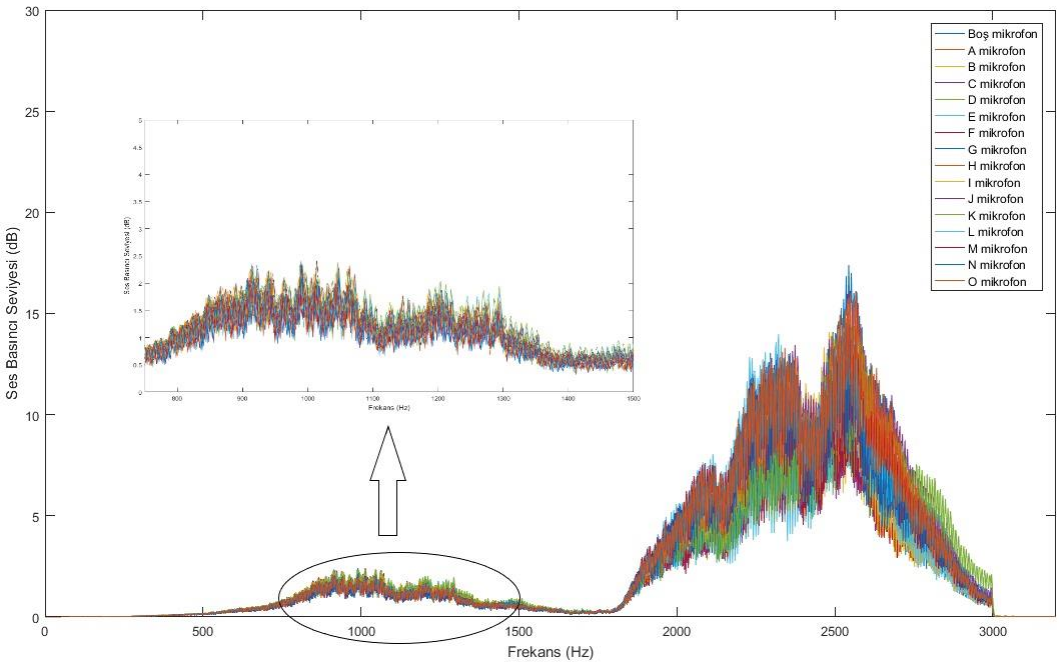
Deney süresince elde edilen ses basınçları Pulse LabShop yazılımı ile Frekans-Ses Basıncı Seviyesi (dB) grafiği olarak kaydedilmiştir. Tüm Helmholtz rezonatörleri ve Helmholtz rezonatörsüz olmak üzere toplam 16 deney yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Daha sonra tüm veriler Matlab programıyla düzenlenip, birleştirilmiştir.

Deney aşamalarında mikrofon ölçümleri alınarak, Helmholtz rezonatörlerinin gürültü azaltıcı etkileri gözlemlenmiştir. Tüm prototiplerin mikrofon ölçüm sonuçlarının bulunduğu grafik şekil 4.11'de verilmiştir. Grafiğin 750 Hz ile 1500 Hz arası daha net görülebilmesi için bu bölgenin yakınlaştırılmış görüntüsü grafik üzerinde detaylandırılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda farklı frekans değerlerinde, mikrofon ile elde edilen ses basıncı seviyeleri görülmektedir. En yüksek ses basıncı seviyeleri Helmholtz rezonatörsüz (boş) plakta 2542 Hz'de 17.34 dB olduğu görülmektedir. Helmholtz rezonatörü bulunan sistemlerde ise rezonatörsüz sisteme göre daha alçak ses basıncı seviyeleri elde edilmiştir. Bu sistemlerden, 2542 Hz noktasında en alçak ses basıncı ise en küçük boyun uzunluğuna sahip A kodlu Helmholtz rezonatöründe 10.47 dB olarak ölçülmüştür.

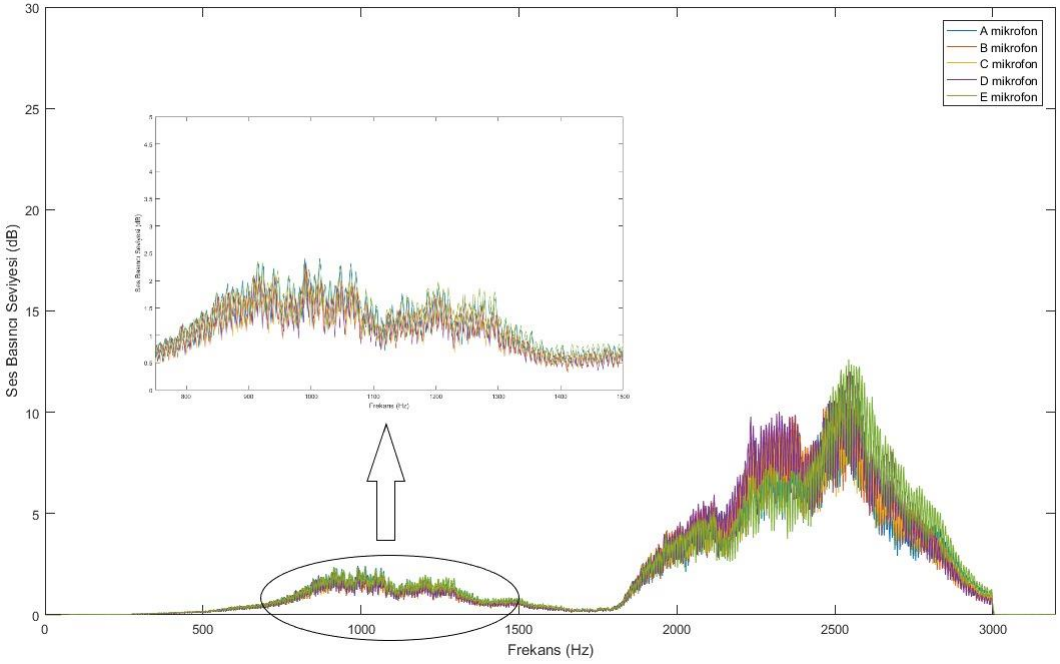
Her Helmholtz rezonatör grubu kendi arasında ayrıca görselleştirilmiştir. Şekil 4.12'de boyun uzunlukları incelenen A, B, C, D, E kodlu birinci grup Helmholtz rezonatörlerinin grafiği bulunmaktadır. Grup içerisinde en yüksek ses basıncı seviyesi 2600 Hz ve yakınlarında boyun uzunluğu en yüksek olan E kodlu Helmholtz rezonatörü olduğu görülmektedir. Ardından 2600 Hz bölgesindeki en yüksek ses basıncı seviyeleri sırasıyla, boyun uzunluğu ikinci ve üçüncü yüksek olan D ve C rezonatörlü sistemler olduğu görülmektedir. En kısa ikinci boyun uzunluğuna sahip B rezonatörlü sistem ve en kısa boyun uzunluğuna sahip A rezonatörlü sistem, birbirlerine çok yakın olmakla birlikte 2600 Hz bölgesindeki en düşük ses basıncı seviyelerine sahip oldukları görülmektedir. Şekil 4.11'de olduğu gibi, Şekil 4.12'de de 750 Hz ile 1500 Hz arasına yakınlaştırma işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.13'te boyun çapları incelenen F, G, H, I, J kodlu ikinci grup Helmholtz rezonatörlerinin grafiği verilmiştir. Grafiğe bakıldığında aynı frekans aralıklarında, benzer piklerin oluştuğu gözlemlenmektedir. Yine 750 Hz ile 1500 Hz aralığına yakınlaştırma uygulanmıştır. Grafikte görülen en yüksek değerin aynı frekans değerlerinde, en büyük boyun çapıyla J kodlu Helmholtz rezonatörüne sahip prototipte olduğu görülmektedir. İkinci en

büyük boyun çaplı I ve üçüncü en büyük boyun çaplı H sırasıyla, ikinci ve üçüncü en büyük ses basıncı seviyelerine sahip olmaktadır. En küçük boyun çapına sahip F rezonatörlü sistemde en alçak ses basıncı seviyesi görülürken, en küçük ikinci boyun çapına sahip G rezonatörlü sistem 2600 Hz yakınlarında en alçak ikinci ses basıncı seviyesine sahip olmaktadır. Şekil 4.14 koni çaplarının incelendiği K, L, M, N, O kodlu Helmholtz rezonatörlerinin bulunduğu üçüncü gruptan oluşmaktadır. Şekil 4.14'teki grafik incelendiğinde yine aynı frekans aralıklarında benzer davranışlar sergilendiği görülmektedir. Yakınlaştırılmış bölge 750 Hz ile 1500 Hz arasını detaylandırmaktadır. Bu grupta en yüksek ses basıncı seviyesini gören prototip 2600 Hz frekans alanında, en büyük koni giriş çapına sahip O kodlu Helmholtz rezonatörlü sistem olmaktadır. K, L, M, N rezonatörlü sistemler 2600 Hz bölgesinde birbirlerine çok yakın ses basıncı seviyelerine sahip olup, belirgin bir fark görülmemektedir. Şekil 4.15'te Helmholtz rezonatörü bulunmayan prototipin grafiği tek başına verilmiştir.

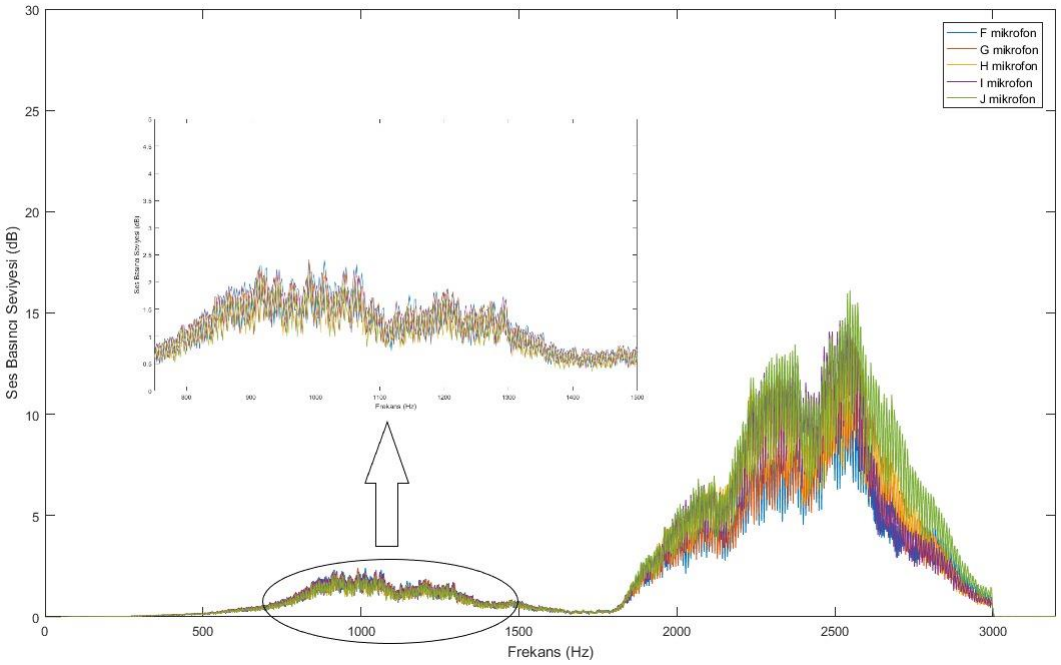
Şekil 4.12 ve Bölüm 4.4'te bulunan Şekil 4.7 birlikte incelendiğinde, mikrofon ile en yüksek ses basıncı seviyelerinin ölçüldüğü 2600 Hz ve yakınlarında, boyun uzunlukları karşılaştırılan birinci grup rezonatörlerinin o bölgede elde ettikleri enerji hasatlarında artış gözlemlenmektedir. Boyun uzunlukları değişen birinci grup rezonatörler, o bölgede en yüksek enerji çıktılarını elde ederken aynı zamanda mikrofonda ölçülen ses basıncı seviyelerinin de en düşük ölçüldüğü grup olduğu belirlenmektedir. Şekil 4.13 ve Bölüm 4.4'te yer alan Şekil 4.8 incelendiğinde, daha yüksek ses basıncı seviyelerinin ölçüldüğü boyun çapları değişen ikinci grup Helmholtz rezonatörleri, enerji hasatlarında ise daha düşük kazanımlar elde ettikleri görülmektedir. Bu sefer Şekil 4.14 ve Bölüm 4.4'te yer alan Şekil 4.9'a birlikte bakıldığında, koni çapları değişen üçüncü grup rezonatörlü sistemlerde yüksek ses basıncı seviyelerinin oluştuğu ve daha düşük enerji hasatlarının gerçekleştiği görülmektedir. 2600 Hz bölgesinde daha yüksek ses basıncı seviyelerine sahip ikinci ve üçüncü grup rezonatörlerin, daha alçak ses basıncı seviyesi ölçülen birinci grup Helmholtz rezonatörlerine göre daha az enerji hasadı gerçekleştirmişlerdir.



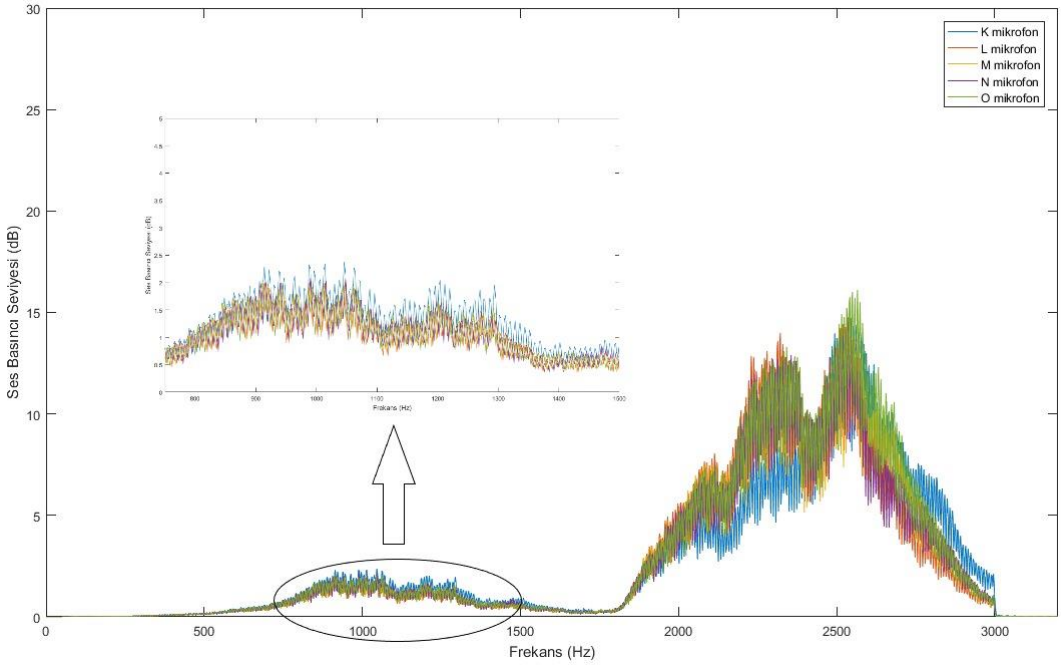
Şekil 4. 11. Tüm prototiplerin Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği



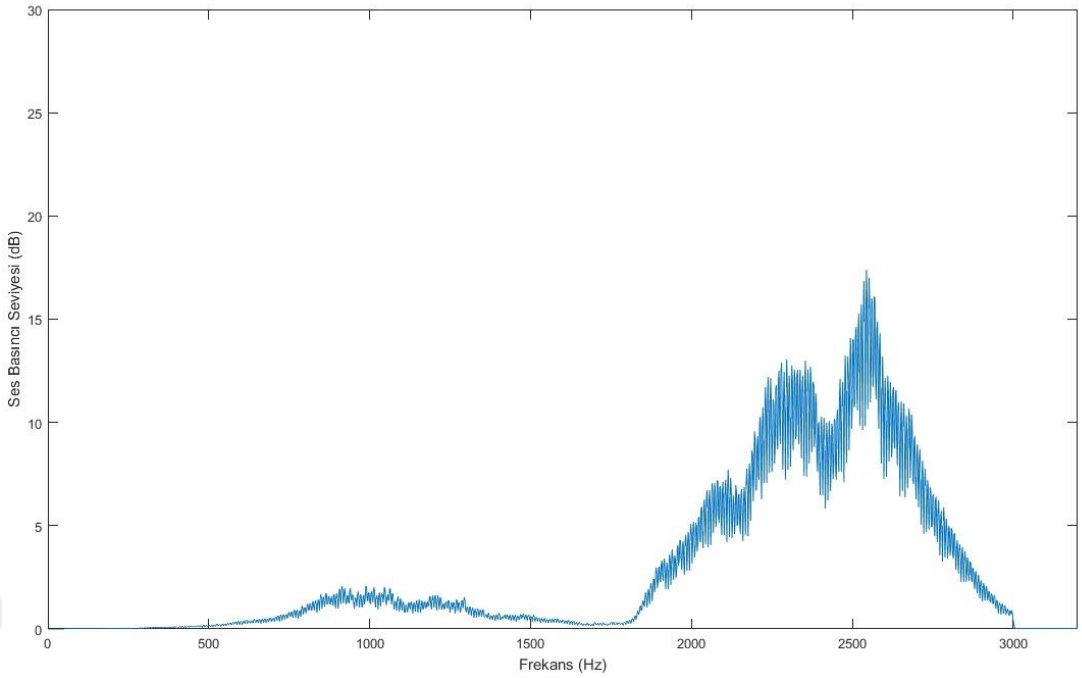
Şekil 4. 12. Helmholtz rezonatörlerinin boyun uzunluğunun incelendiği grubun Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği



Şekil 4. 13. Helmholtz rezonatörlerinin boyun çaplarının incelendiği grubun Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği



Şekil 4. 14. Helmholtz rezonatörlerinin koni çaplarının incelendiği grubun Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği



Şekil 4. 15. Helmholtz rezonatörsüz sistemin Frekans-Ses Basıncı Seviyesi grafiği

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında piezoelektriksel etki yardımıyla, akustik ses basıncı altında enerji hasat etme ve gürültü azaltma üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sistemden elde edilecek enerjiyi arttırmak ve oluşan çevresel gürültüyü azaltmak adına Helmholtz rezonatörleri tasarlanmıştır. Farklı boyutsal özelliklere sahip 15 Helmholtz rezonatörünün, rezonans frekanslarına etkisi olduğu daha önce kanıtlanmış olan boyun uzunlukları ve boyun çaplarıyla birlikte, bu çalışmanın özgün tasarımı olan koni çaplarının etkileri araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular ve tartışmalar aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.

Tasarlanan Helmholtz rezonatörlerinin üretimi üç boyutlu yazıcıyla gerçekleştirilmiştir. Üretilen ve tasarlanan rezonatörler arasında, üretim metodundaki yüksek sıcaklıkların etkisi nedeniyle boyutsal farklılıklar olduğu saptanmıştır. Oluşan bu sapmaların %0 ile %27.08 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek oranlı sapmaların kalınlıklar arasında olduğu belirlenmiştir.

Alüminyum plak ve Helmholtz rezonatörlerinin rijit bağlanmış olmaları, rezonans bölgelerinin yakın frekanslarda olmalarını sağlamıştır. M. Yuan ve ark. [21] metalik bazlı alt tabaka kullanımının gerilim sürecini ortadan kaldıracağını ve mühendislik uygulamaları için daha fazla dayanıklılık sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Bu nedenler enerji hasatlarında alt tabaka olarak metalik bazlı plak seçimini destekler nitelikte olmaktadır.

Plak, akustik basıncın neden olduğu bazı titreşim frekanslarında yüksek ivme tepkisi vermektedir. Bu frekanslar, plağın rezonans frekanslarına karşılık gelmektedir. Plağın en yüksek ivme değeri 1910 Hz'de 40.63 m/s^2 olarak ölçülmüştür. Tüm Helmholtz rezonatörleri plak üzerine rijit sabitlenerek, plak ile bazı ortak rezonans bölgelerine sahip olmuşlardır. Frekans-ivme cevap grafikleri incelenirken 1-400 Hz, 800-1000 Hz, 1975-2410 Hz ve 2780-3200 Hz olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır. Tüm Helmholtz rezonatörleri arasından, birinci bölgedeki en yüksek ivme değerinin 270 Hz'de 0.5635 m/s^2 ile ikinci gruptaki üçüncü büyük boyun çapına sahip olan H rezonatöründe olduğu saptanmıştır. İkinci bölgedeki en yüksek ivme değerinin 970 Hz'de 0.3718 m/s^2 ile birinci gruptaki en uzun boyunlu E rezonatöründe olduğu

görülmüştür. Üçüncü bölgedeki en yüksek ivme değeri 2208 Hz'de 0.4342 m/s^2 ile ikinci grubun ikinci büyük boyun çapına sahip I rezonatöründe gözlemlenmiştir. Dördüncü bölgede ise en yüksek ivme değeri, birinci gruptaki ikinci en uzun boyunlu D rezonatöründe 3197 Hz'de 4.66 m/s^2 olarak ölçülmüştür.

Akustik basınç altında belirli frekanslar arasında akustik rezonans bölgeleri oluşmaktadır. Enerji hasatlarının özellikle bu bölgelerde arttığı gözlemlenmiştir. Bu bölgeler 50-200 Hz, 750-1000 Hz, 1250-1500 Hz ve 2550-3000 Hz aralıklarında oldukları belirlenmiştir. En düşük frekans bölgesi olan 50-200 Hz aralığında, tüm sistemlerden yüksek enerji kazanımları elde edildiği görülmüştür. En yüksek anlık voltaj 166 mV olarak ölçülmüştür. Aynı frekanstaki boş plaktan yaklaşık %260 daha fazla enerji hasadı gerçekleştirilmiştir. M. Yuan ve ark. [28] önerdikleri akustik rezonatörün 7.3 μW hasat gücü ile en yüksek enerji hasadının 175 Hz'de gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. J. Li ve ark. da [20] oluşturdukları akustik hasat sistemlerindeki enerji hasadını düşük frekans aralığında olan 356 Hz yakınlarında %15.3'e kadar arttığını gözlemlemişlerdir. X. Cui ve ark. [34] tasarladıkları meta yüzeyi Helmholtz rezonatörü ile kullanmanın elde edilen voltajı 3.2 kat arttırdığını belirtmişlerdir. B. Duan ve ark. [41] oluşturdukları sistemlerde 100 dB'lik ses basıncı seviyesinde 200 Hz ve yakınlarında maksimum voltaj elde etmişlerdir. Benzer bir çalışmada ise M. Yuan ve ark. [43] tasarladıkları yarıklı Helmholtz rezonatörüne 100 dB ses basıncı seviyesi uyguladıklarında 217 Hz ve 341 Hz'de maksimum enerji toplayabildiklerini göstermişlerdir. Düşük frekans bölgelerinde yüksek enerji kazanımları elde etmenin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Frekans değerleri arttıkça bazı rezonatörlü sistemlerin boş plaktan daha az, bazılarınınsa daha fazla enerji hasat ettiği görülmektedir. Yüksek frekans bölgesinde (2550-3000 Hz) en yüksek enerji hasadı 118 mV gerçekleşmiştir. Bu da aynı bölgedeki rezonatörsüz sistemden yaklaşık %90 daha fazla enerji üretildiği sonucunu göstermektedir. M. Yuan ve ark. da [28] kendi çalışmalarında bahsettiği gibi bu rezonatörlü yapının düşük frekanslar için uygun olduğu, yüksek frekanslar için de geliştirilmeye açık ve yüksek potansiyelleri olduğu söylenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında Helmholtz rezonatörlerine ses basıncını daha fazla toplaması amacıyla koni şeklinde gürültü giriş modülleri eklenmiştir. Deney prototiplerinin yanından yapılan mikrofon ölçüm sonuçlarına göre, Helmholtz rezonatörü bulunmayan sistemden 2542 Hz'de 17.34 dB ses basıncı seviyesi elde

edilmiştir. Bu seviye tüm sistemler arasından elde edilen en yüksek dB değerini göstermektedir. Aynı frekanstaki en alçak ses seviyesi basıncı ise en kısa boyunlu A kodlu Helmholtz rezonatöründe ölçülmüştür. Ölçülen seviye 2542 Hz'ye karşılık 10.47 dB'ye denk gelmektedir. Ses basıncı seviyelerindeki farka göre 6.87 dB'lik akustik sönümleme olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar bize gürültünün yaklaşık %65'e kadar azaltılabileceğini göstermektedir. Y. Wang ve ark. [17] da Helmholtz rezonatörüne bal peteği şeklinde gürültü giriş modülü eklemişlerdir ve rezonatör içerisinde daha fazla ses basıncı ölçtüklerini belirtmişlerdir. N. N. Deshmukh ve ark. [32] yaptıkları çalışmada Helmholtz rezonatörünün sönümleyici etkilerini araştırmışlar ve oluşturdukları en iyi kombinasyonlarıyla 30 dB'lik akustik sönümleme elde etmişlerdir. S. Noh ve ark. [13] yaptıkları araştırmada Helmholtz rezonatörlü sistemin, rezonatörsüz sisteme göre yaklaşık 5.3 kat daha fazla voltaj elde ettiğini ve sürekli gürültülü ortamda belirli frekans bant genişliğindeki gürültüyü ortadan kaldırabileceğini açıklamışlardır. Akustik enerji hasadı deneyindeki mikrofon ölçümleri ile Helmholtz rezonatörlerinin gürültü azaltıcı etkileri literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Helmholtz rezonatörleri tasarımlarında kullanılan, denklem (8) ve (9)'da belirtilen parametreler olan boyun uzunluğunun ve boyun çapının etkilerine bakılmıştır. Deneyde mikrofon ölçümü prototipin yanında, ortamdaki ses basıncıyla gerçekleştirilmiştir. En yüksek ses basıncı seviyelerinin oluştuğu 2500-2600 Hz bölgesinde elde edilen sonuçlara göre, rezonatörlerin boyun uzunluğu arttıkça mikrofonda ölçülen ses basıncı seviyesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu frekans bölgesinde boyun uzunluğu artışının, ses yalıtımını azalttığı keşfedilmiştir. Diğer bakılan parametrelerden biri de boyun çapı olmuştur. 2500-2600 Hz frekans aralığı için boyun çapının artması, mikrofonda ölçülen ses basıncı seviyesini de arttırmaktadır. Bu durumda boyun çapının artması, ses yalıtımını azalttığı sonucu çıkarılabilmektedir. Aynı frekans bandında bakılan Helmholtz rezonatörlerinde bulunan koni çaplarındaki değişikliklere bakıldığında, en büyük çapa sahip rezonatörde en yüksek ses basıncı seviyesi ölçülmüştür. Diğer rezonatörlerin bulunduğu prototiplerde ise birbirlerine göre belirgin farklılıklar oluşmamıştır. Bu durumda boyun uzunluğunun ve boyun çapının gürültü azaltımında koni çapına göre daha önemli olduğu sonucu çıkarılmaktadır. D. Guan ve ark. [14] düşük frekans aralığında yaptıkları Helmholtz rezonatörü çalışmasında, rezonatörün giriş genişliği ve

uzunluğu gibi geometrik parametrelere duyarlı olduklarını saptamışlardır. Geniş frekans aralığında yapılan bu tez çalışmasında da yüksek frekanslar için de aynı uyumun yakalanabildiği söylenebilmektedir.

Sonuç olarak yenilenebilir enerjinin önemi her geçen gün artarken, bu tez çalışması akustik enerji hasadının bu alanda var olabileceğini göstermek üzere literatüre geniş analiz yöntemleri sunmuştur. Enerji hasadıyla birlikte, ses yalıtımının mümkün olduğu geniş frekans aralıklarında gösterilmiştir. Gelecekte frekans aralıkları genişletilerek, akustik enerji hasadını ve ses yalıtımını arttırmak üzerine çalışmalar yapılabilir. Her frekans aralığında verimli çalışan sistemler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Erturk, A., Anton, S. R., & Inman, D. J. (2009, April). Piezoelectric energy harvesting from multifunctional wing spars for UAVs: Part 1. Coupled modeling and preliminary analysis. In Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009 (Vol. 7288, pp. 157-171). SPIE.

[2] Anton, S. R., Erturk, A., & Inman, D. J. (2009, April). Piezoelectric energy harvesting from multifunctional wing spars for UAVs: Part 2. experiments and storage applications. In Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009 (Vol. 7288, pp. 172-183). SPIE.

[3] Tang, X., & Zuo, L. (2012). Vibration energy harvesting from random force and motion excitations. Smart Materials and Structures, 21(7), 075025.

[4] Horowitz, S. B., Sheplak, M., Cattafesta, L. N., & Nishida, T. (2006). A MEMS acoustic energy harvester. Journal of Micromechanics and Microengineering, 16(9), S174.

[5] Lallart, M., Guyomar, D., Richard, C., & Petit, L. (2010). Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices. The Journal of the Acoustical Society of America, 128(5), 2739-2748.

[6] Wang, W. C., Wu, L. Y., Chen, L. W., & Liu, C. M. (2010). Acoustic energy harvesting by piezoelectric curved beams in the cavity of a sonic crystal. Smart Materials and Structures, 19(4), 045016.

[7] Li, B., You, J. H., & Kim, Y. J. (2013). Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator. Smart Materials and Structures, 22(5), 055013.

[8] Salem, S., Fraňa, K., & Nová, I. (2020, May). Design of acoustic energy harvesting unit using piezo-electric diaphragm. In Materials Science Forum (Vol. 986, pp. 109-115). Trans Tech Publications Ltd.

[9] Mir, F., Saadatzi, M., Ahmed, R. U., & Banerjee, S. (2018). Acoustoelastic MetaWall noise barriers for industrial application with simultaneous energy harvesting capability. Applied Acoustics, 139, 282-292.

[10] Khan, F. U. (2015). State of the art in acoustic energy harvesting. Journal of Micromechanics and Microengineering, 25(2), 023001.

[11] Liu, F., Horowitz, S., Nishida, T., Cattafesta, L., & Sheplak, M. (2007). A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator. The Journal of the Acoustical Society of America, 122(1), 291-301.

[12] Liu, F., Phipps, A., Horowitz, S., Ngo, K., Cattafesta, L., Nishida, T., & Sheplak, M. (2008). Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator. The Journal of the Acoustical Society of America, 123(4), 1983-1990.

[13] Noh, S., Lee, H., & Choi, B. (2013). A study on the acoustic energy harvesting with Helmholtz resonator and piezoelectric cantilevers. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14, 1629-1635.

[14] Guan, D., Wu, J. H., Jing, L., Gao, N., & Hou, M. (2015). Application of a Helmholtz structure for low frequency noise reduction. Noise Control Engineering Journal, 63(1), 20-35.

[15] Pillai, M. A., & Deenadayalan, E. (2014). A review of acoustic energy harvesting. International journal of precision engineering and manufacturing, 15, 949-965.

[16] Noh, H. M. (2018). Acoustic energy harvesting using piezoelectric generator for railway environmental noise. Advances in Mechanical Engineering, 10(7), 1687814018785058.

[17] Wang, Y., Zhu, X., Zhang, T., Bano, S., Pan, H., Qi, L., ... & Yuan, Y. (2018). A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film. Applied Energy, 230, 52-61.

[18] Cui, X. B., Huang, C. P., & Hu, J. H. (2015). Sound energy harvesting using an acoustic grating. Journal of Applied Physics, 117(10).

[19] Liu, G. S., Peng, Y. Y., Liu, M. H., Zou, X. Y., & Cheng, J. C. (2018). Broadband acoustic energy harvesting metasurface with coupled Helmholtz resonators. Applied Physics Letters, 113(15).

[20] Li, J., Zhou, X., Huang, G., & Hu, G. (2016). Acoustic metamaterials capable of both sound insulation and energy harvesting. Smart Materials and Structures, 25(4), 045013.

[21] Yuan, M., Cao, Z., Luo, J., & Ohayon, R. (2018). Acoustic metastructure for effective low-frequency acoustic energy harvesting. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 37(4), 1015-1029.

[22] Yuan, H., Yu, H., Liu, X., Zhao, H., Zhang, Y., Xi, Z., ... & Xu, M. (2021). A high-performance coniform Helmholtz resonator-based triboelectric nanogenerator for acoustic energy harvesting. Nanomaterials, 11(12), 3431.

[23] Kralov, I. M., Terzieva, S. D., & Ignatov, I. P. (2011). Analysis of methods and MEMS for acoustic energy harvesting with application in railway noise reduction. In MECAHITECH '11 (Vol. 3, No. 1, pp. 56-62).

[24] DOKUR, E., GÖKHASAN, O., Okan, Ö. R. S., & KURBAN, M. (2016). Ulaşım Sistemlerinde Titreşim Tabanlı Enerji Hasadı ve Uygulamalı Analizi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 52-58.

[25] Wu, L. Y., Chen, L. W., & Liu, C. M. (2009). Acoustic energy harvesting using resonant cavity of a sonic crystal. Applied Physics Letters, 95(1).

[26] Carrara, M., Cacan, M. R., Leamy, M. J., Ruzzene, M., & Erturk, A. (2012). Dramatic enhancement of structure-borne wave energy harvesting using an elliptical acoustic mirror. Applied Physics Letters, 100(20).

[27] Eghbali, P., Younesian, D., & Farhangdoust, S. (2020). Enhancement of the low-frequency acoustic energy harvesting with auxetic resonators. Applied Energy, 270, 115217.

[28] Yuan, M., Cao, Z., Luo, J., & Pang, Z. (2018). Helix structure for low frequency acoustic energy harvesting. Review of Scientific Instruments, 89(5).

[29] Khan, F. U., & Izhar, I. (2016). Hybrid acoustic energy harvesting using combined electromagnetic and piezoelectric conversion. Review of Scientific Instruments, 87(2).

[30] Lallart, M., Guyomar, D., Richard, C., & Petit, L. (2010). Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices. The Journal of the Acoustical Society of America, 128(5), 2739-2748.

[31] Papadakis, N. M., & Stavroulakis, G. E. (2023). FEM Investigation of a Multi-Neck Helmholtz Resonator. Applied Sciences, 13(19), 10610.

[32] Deshmukh, N. N., Ansari, A., Degwekar, S., Paul, B., & Unnikrishnan, R. (2023). Effect of geometrical parameters and use of porous material in a Helmholtz resonator on suppression of thermo-acoustic instabilities. International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 15(2), 127-136.

[33] Song, C., Ma, X., Zhao, J., Zhang, J., Yang, F., Pan, Y., & Zhang, X. (2022). Broadband Sound Absorption and Energy Harvesting by a Graded Array of

Helmholtz Resonators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 29(3), 777-783.

[34] Cui, X., Shi, J., Liu, X., & Lai, Y. (2021). A panel acoustic energy harvester based on the integration of acoustic metasurface and Helmholtz resonator. Applied Physics Letters, 119(25).

[35] Zhong, J., Chai, Z., & Xiang, J. (2024). Double defects in trampoline effect and Helmholtz coupled acoustic metamaterial for broadband piezoelectric energy harvesting. Wave Motion, 124, 103248.

[36] Li, B., Chen, H., Xia, B., & Yao, L. (2023). Acoustic energy harvesting based on topological states of multi-resonant phononic crystals. Applied Energy, 341, 121142.

[37] Li, D., Hu, M., Wu, F., Liu, K., Gao, M., Ju, Z., ... & Bao, A. (2022). Design of tunable low-frequency acoustic energy harvesting barrier for subway tunnel based on an optimized Helmholtz resonator and a PZT circular plate. Energy Reports, 8, 8108-8123.

[38] Pillai, M. A., & Ezhilarasi, D. (2016). Improved acoustic energy harvester using tapered neck Helmholtz resonator and piezoelectric cantilever undergoing concurrent bending and twisting. Procedia Engineering, 144, 674-681.

[39] Hassan, E., Kouritem, S. A., Amer, F. Z., & Mubarak, R. I. (2024). Acoustic energy harvesting using an array of piezoelectric cantilever plates for railways and highways environmental noise. Ain Shams Engineering Journal, 15(3), 102461.

[40] Peng, X., Wen, Y., Li, P., Yang, A., & Bai, X. (2013). Enhanced acoustoelectric coupling in acoustic energy harvester using dual helmholtz resonators. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 60(10), 2121-2128.

[41] Duan, B., Wu, K., Chen, X., Ni, J., Ma, X., Meng, W., ... & Yu, P. (2023). Bioinspired PVDF Piezoelectric Generator for Harvesting Multi-Frequency Sound Energy. Advanced Electronic Materials, 9(8), 2300348.

[42] Yuan, M., Wang, X., & Ding, Z. (2018). Low frequency acoustic energy harvesting adopting slit Helmholtz resonator. Vibroengineering Procedia, 20, 151-155.

[43] Yuan, M., Cao, Z., Luo, J., & Pang, Z. (2018). Low frequency acoustic energy harvester based on a planar Helmholtz resonator. AIP Advances, 8(8).

[44] Mao, Y., Shi, M., & Xu, C. (2023). Investigation on multiple-frequency resonant characteristics of a Helmholtz resonator with an extended neck. AIP Advances, 13(10).

[45] Kim, S., Choi, J., Seung, H. M., Jung, I., Ryu, K. H., Song, H. C., ... & Kim, M. (2022). Gradient-index phononic crystal and Helmholtz resonator coupled structure for high-performance acoustic energy harvesting. Nano Energy, 101, 107544.

[46] Bowen, C. R., Topolov, V. Y., & Kim, H. A. (2016). Modern piezoelectric energy-harvesting materials. Cham: Springer International Publishing.

[47] Çetin, H. G. (2015). Geniş Bantlı ve Düşük Frekanslı Mekanik Titreşimler için Esnek Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemi Tasarımı ve Üretimi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 100 s. (Yüksek Lisans)

[48] Liu, H., Zhong, J., Lee, C., Lee, S. W., & Lin, L. (2018). A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. Applied Physics Reviews, 5(4).

[49] Kim, H. S., Kim, J. H., & Kim, J. (2011). A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. International journal of precision engineering and manufacturing, 12, 1129-1141.

[50] Koçak, B. (2019). Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Enerji Hasadı ve Batarya Şarjı. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 41 s. (Yüksek Lisans)

[51] Zhu, X. (2010). Piezoelectric ceramic materials: processing, properties, characterization, and applications (pp. 1-34). Nova Science Publishers.

[52] Shu, Y. C., & Lien, I. C. (2006). Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems. Smart materials and structures, 15(6), 1499.

[53] Yuan, M., Cao, Z., Luo, J., & Chou, X. (2019). Recent developments of acoustic energy harvesting: A review. Micromachines, 10(1), 48.

[54] Ahmed, R., Mir, F., & Banerjee, S. (2017). A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity. Smart Materials and Structures, 26(8), 085031.

[55] Atrah, A. B., & Salleh, H. (2013). Simulation of acoustic energy harvester using helmholtz resonator with piezoelectric backplate. ICSV20, 30-37.

[56] Deshmukh, N. N., Ansari, A., & Samuel, A. A. (2022, December). Investigation of Effect of Porous Material on Performance of Helmholtz Resonator.[Conference presentation]. International Conference on Vibration Engineering, Vashi, Navi Mumbai.

[57] Mir, F., Mandal, D., & Banerjee, S. (2023). Metamaterials for Acoustic Noise Filtering and Energy Harvesting. Sensors, 23(9), 4227.

[58] Matsuda, T., Tomii, K., Hagiwara, S., Miyake, S., Hasegawa, Y., Sato, T., ... & Nishioka, Y. (2013, December). Helmholtz resonator for lead zirconate titanate acoustic energy harvester. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 476, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.

[59] Qi, S., Oudich, M., Li, Y., & Assouar, B. (2016). Acoustic energy harvesting based on a planar acoustic metamaterial. Applied Physics Letters, 108(26).

[60] Ma, K., Tan, T., Yan, Z., Liu, F., Liao, W. H., & Zhang, W. (2021). Metamaterial and Helmholtz coupled resonator for high-density acoustic energy harvesting. Nano Energy, 82, 105693.

[61] Özmen, U. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Mekanik Analizi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2021, 111 s. (Doktora)