

**Piezoelektrik Malzemelerle Enerji Hasatı**

Emre Tüfekçioğlu  
Doktora Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Ekim 2014

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Emre TÜFEKÇİOĞLU'nun "Piezoelektrik Malzemelerle Enerji Hasatı"** başlıklı **Seramik Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 24.10.2014 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
<b>Üye (Tez Danışmanı):</b>	<b>Prof. Dr. Aydın DOĞAN</b>	
<b>Üye</b>	<b>: Prof. Dr. Servet TURAN</b>	
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Hakan Güray ŞENEL</b>	
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Gürsoy ARSLAN</b>	
<b>Üye</b>	<b>: Prof Dr. Yavuz YAMAN</b>	

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .....**  
**tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

### Doktora Tezi

### Piezoelektrik Malzemelerle Enerji Hasatı

**Emre TÜFEKÇİOĞLU**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Aydın DOĞAN  
2014, 148 Sayfa**

Bu çalışmada mekanik titreşimlerden enerji üretmek amacıyla kullanılan zil tipi (cymbal) transdüser esaslı piezoelektrik enerji hasatı (PEH) ünitelerinin tasarım kriterleri irdelenmiştir.

Öncelikle, yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik seramiklerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Faz oluşumu X-ışınları kırınımı ile incelenmiş ve malzemenin piezoelektrik özelliklerini olumsuz etkileyen payroklor fazının oluşmasını engelleyecek süreç değişkenleri incelenmiştir. Üretilen seramik numunelerin mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Sonraki adım, yapıların titreşim frekansı ile örtüşmelerini sağlamak amacıyla transdüserlerin rezonans frekanslarını azaltmaktır. Bunun için yenilikçi bir metal kiriş tasarımı modeli oluşturulmuştur. Bu metal yapının matematik modeli Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak, sonlu elemanlar modeli de ANSYS kodu kullanılarak oluşturulmuştur.

Rezonans frekansının kiriş uzunluğuna ve uç kütlesine göre değişimi incelenmiştir. Sonraki aşamada zil tipi transdüserlerin enerji hasatı performansları değerlendirilmiştir. Son olarak, transdüserler metal kirişle birleştirilerek yeni bir PEH ünitesi oluşturulmuştur. Frekansın ve uç kütleinin değişimine bağlı olarak transdüserlerin güç üretimi karakterize edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Piezoelektrik, Zil Tipi Transdüser, Enerji Hasatı

## **SUMMARY**

### **PhD Dissertation**

### **Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials**

**Emre TÜFEKÇİOĞLU**

**Anadolu University  
Graduate School of Science  
Ceramic Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Aydın DOĞAN  
2014, 148 Pages**

In this study, design aspects of piezoelectric energy harvesters (PEHs) used for generating energy from mechanical vibrations were addressed. Initially, high energy density piezoelectric ceramics were produced. The phase formation was characterized using X-ray diffraction and the processing parameters for elimination of the pyrochlore phase which is detrimental to piezoelectric properties were searched. Microstructure of the samples were inspected using SEM images.

Secondly, to reduce the resonance frequencies of the transducers, for a better matching with the vibration frequencies of human made structures, a novel metallic beam structure was modeled. The mathematical model of the structure was constructed using the Euler-Bernoulli beam theory and the finite element model was built with ANSYS code.

The change in resonance frequency depending on the thickness of the beam, the length of the beam and the tip mass attached to the beam was computed. As a further step forward, the energy harvesting performances of cymbal transducers were evaluated.

Finally, the cymbal transducers were attached to the metallic energy harvesting structure to form the PEH. The power output of the transducers were calculated for varying frequencies and changing tip mass.

**Keywords:** Piezoelectric, Cymbal Transducer, Energy Harvesting

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca bilgi ve desteğini hep yanımda bulduğum, kendisi ile çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Aydın Doğan'a en derin şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarımın yönlendirilmesi ve değerlendirilmesinde bana yol gösterici olan tez izleme jürimdeki hocalarım Prof. Dr. Servet Turan ve Doç. Dr. Hakan Güray Şenel'e teşekkürlerimi sunarım.

Son derece değerli görüşleri ve önerileri ile tezime kıymeti ölçülemez katkılarda bulunarak beni çalışmalarım konusunda her zaman cesaretlendiren Prof. Dr. Yavuz Yaman'a sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Sevgili çalışma arkadaşlarım Yard. Doç. Dr. İ. Özgür Özer, Yard. Doç. Dr. Ceren Pekşen ve Dr. H. Boğaç Poyraz'a değerli destek ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca attığım her adımda bana destek olan sevgili annem Ayşe Tüfekçioğlu ve babam Ayhan Tüfekçioğlu'na minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Ve en çok da, doktora süreci boyunca gösterdiği sabır, bitmez tükenmez desteği ve bana olan inancı için sevgili eşim Nihan Tüfekçioğlu'na sonsuz teşekkürler.

Emre Tüfekçioğlu

Ekim 2014

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Titreşimden Enerji Hasatı Metodları	7
1.1.1 Elektrostatik Enerji Hasatı	13
1.1.2 Elektromanyetik Enerji Hasatı	15
1.1.3 Piezoelektrik Enerji Hasatı	17
1.2 Piezoelektrik Seramikler	24
<b>2. AMAÇ VE ÖNEM</b>	<b>29</b>
<b>3. YÜKSEK ENERJİ YOĞUNLUKLU PİEZOELEKTRİK SERAMİK KOMPOZİSYONLARI</b>	<b>31</b>
3.1 Teori	31
3.2 PZN-PZT Sistemi	32
3.3 Sonuçlar	37
3.3.1 Perovskit Fazı Kararlılığı ve Mikro Yapının İncelemesi	37
3.3.2 Dielektrik ve Piezoelektrik Özellikler	46
<b>4. ENERJİ HASATI SİSTEMİNİN MATEMATİK MODELİ</b>	<b>50</b>
4.1 Ankastre Çubuk Modeli	52
4.2 Zil Tipi Transdüserler Eklenmiş Ankastre Çubuk Modeli	55
4.3 Zil Tipi Transdüserler ve Uç Kütle Eklenmiş Ankastre Çubuk Modeli	59

<b>5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ</b>	<b>62</b>
5.1 Tasarım	62
5.2 Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	66
<b>6. ZİL TİPİ TRANSDÜSERLERLE ENERJİ HASATI</b>	<b>68</b>
6.1 Zil Tipi Transdüserin Yapısı	71
6.2 Deneysel Çalışma	75
6.3 Sonuçlar	82
6.3.1 C-PZT1 Transdüserin Enerji Hasatı Karakteristikleri	83
6.3.2 C-PZT2 Transdüserin Enerji Hasatı Karakteristikleri	92
6.3.3 C-PZNN1 Transdüserin Enerji Hasatı Karakteristikleri	101
6.4 Değerlendirmeler	110
<b>7. PİEZOELEKTRİK KOMPOZİT YAPI İLE DÜŞÜK FREKANSLARDA ENERJİ HASATI</b>	<b>115</b>
7.1 B-PZT1 yapısının enerji hasatı özellikleri	116
7.2 B-PZT2 yapısının enerji hasatı özellikleri	120
7.3 B-PZNN1 yapısının enerji hasatı özellikleri	123
7.4 Hasat Edilen Enerjinin Depolanması	126
<b>8. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b>	<b>138</b>
8.1 Üretilen piezoelektrik seramik kompozisyonlarının değerlendirilmesi	138
8.2 Enerji hasatı ünitesinin incelenmesi	139
8.3 Gelecekteki çalışmalar için öneriler	143
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>144</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1.	1990-2003 yılları arasında bilgisayar bileşenlerindeki gelişmeler	2
1.2.	Darbe esasına göre çalışan enerji hasatı sistemi	4
1.3.	Dalola ve Ferrari tarafından önerilen termoelektrik enerji hasatı sistemi	4
1.4.	Sodano ve ark. tarafından önerilen termoelektrik enerji hasatı sistemi	5
1.5.	Kütleye uygulanan kuvvet ile tahrik edilen tek serbestlik dereceli sistem	8
1.6.	Sistemin temeline uygulanan kuvvet ile tahrik edilen tek serbestlik dereceli sistem	9
1.7.	Elektrostatik-esaslı enerji hasatı tasarımları; a) Düzlem içi örtüşmeli, b) Düzlem içi boşluk kapamalı and c) Düzlem dışı boşluk kapamalı	14
1.8.	Dört mıknatıslı elektromanyetik enerji hasatı tasarımı	15
1.9.	Bir NdFeB mıknatıs, bir düzlemsel bakır yay ve iki tabakalı bir bakır folyodan oluşan MEMS elektromanyetik enerji hasatı ünitesi	16
1.10.	40 adet çubuk ve bir mıknatıstan oluşan MEMS elektromanyetik enerji hasatı ünitesi	16
1.11.	İnsan vücudunun değişik bölgelerinden hasat edilebilecek enerji miktarları (söz konusu bölgenin toplam gücü parantez içinde verilmiştir)	19
1.12.	Enerji Hasatı için kullanılan "yılanbalığı" yapısının hareketi	22
1.13.	Tekil bir ankastre kirişin şematik yapısı	23
1.14.	Şekil 1.13'te gösterilen sistemin, tahrik frekansına karşılık çıkış voltajı	23
1.15.	Direkt ve ters piezoelektrik etkiler	24

<b>1.16.</b>	Heckmann Şeması	25
<b>1.17.</b>	Perovskit yapısı	26
<b>1.18.</b>	PZT katı çözeltilisinde faz dönüşümleri	27
<b>3.1.</b>	Karışık oksit yöntemiyle PZN-PZT üretimi	35
<b>3.2.</b>	Kolumbit prekürsör yöntemiyle PZN-PZT üretimi	36
<b>3.3.</b>	Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş ve 1000 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi	39
<b>3.4.</b>	Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş ve 1050 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi	40
<b>3.5.</b>	Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş ve 1100 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi	40
<b>3.6.</b>	Kolumbit prekürsör yöntemiyle üretilmiş ve 1000 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi	41
<b>3.7.</b>	Kolumbit prekürsör yöntemiyle üretilmiş ve 1050 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi	41
<b>3.8.</b>	Kolumbit prekürsör yöntemiyle üretilmiş ve 1100 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi	42
<b>3.9.</b>	a) $2t/cm^2$ , b) $2.5t/cm^2$ ve c) $3t/cm^2$ basınçla şekillendirilmiş ve 1000°C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri	43

<b>3.10.</b>	a) $2t/cm^2$ , b) $2.5t/cm^2$ ve c) $3t/cm^2$ basınçla şekillendirilmiş ve $1050^\circ C$ sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri	44
<b>3.11.</b>	a) $2t/cm^2$ , b) $2.5t/cm^2$ ve c) $3t/cm^2$ basınçla şekillendirilmiş ve $1100^\circ C$ sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri	45
<b>3.12.</b>	PZNN-PZT kompozisyonlarının piezoelektrik yük sabitelerinin ( $d_{33}$ ) sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi	48
<b>3.13</b>	PZNN-PZT kompozisyonlarının dielektrik sabitelerinin ( $K^T$ ) sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi	48
<b>3.14.</b>	PZNN-PZT kompozisyonlarının piezoelektrik voltaj ( $g_{33}$ ) sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi	49
<b>4.1.</b>	Ankastre mesnetli çubuk yapısı	50
<b>4.2.</b>	(a) Piezoelektrik enerji hasatı ünitesi ve (b) bileşenleri	51
<b>4.3.</b>	Enerji Hasatı Ünitesi için önerilen model	52
<b>4.4.</b>	Dönme ( $k_r$ ) ve öteleme ( $k_t$ ) deformasyonlarını ifade eden yayların sistemde modellenmesi	53
<b>4.5.</b>	Enerji hasatı ünitesinin uç kütlesi olmaksızın oluşturulan modeli	56
<b>4.6.</b>	Çubuğun sonsuz küçük bir elemanın serbest cisim diyagramı	57
<b>4.7.</b>	Çubuğun kütle eklenmiş halindeki sağ ucunun serbest cisim diyagramı	59
<b>5.1.</b>	Ankastre mesnetli çubuk yapısı için tasarım parametreleri	63
<b>5.2.</b>	Enerji hasatı ünitesinin (a) Birinci düzlem dışı, (b) birinci düzlem içi ve (c) ikinci düzlem dışı titreşim modları	65

<b>5.3.</b>	Çubuk uzunluğu ve uç kütleyle bağlı olarak rezonans frekansının değişimi	66
<b>6.1.</b>	Zil tipi transdüser	68
<b>6.2.</b>	Tek tabakalı seramik disk ile oluşturulan zil tipi transdüser (C-PZT1 ve C-PZNN1)	69
<b>6.3.</b>	İki tabakalı seramik disk ile oluşturulan zil tipi transdüser (C-PZT2)	70
<b>6.4.</b>	Uygulanan aksenal kuvvete karşılık zil tipi transdüserde oluşan tepki	71
<b>6.5.</b>	Transdüser e etk eden kuvvetler	72
<b>6.6.</b>	Zil tipi transdüserin kapaklarını temsil eden Belleville yayı gösterimi	74
<b>6.7.</b>	Eklenen ağırlığın fonksiyonu olarak $p$ noktasında oluşan dairesel ( $\sigma_{px}$ ) ve aksenal ( $\sigma_{py}$ ) gerilmeler	74
<b>6.8.</b>	Çelik çerçeve içerisine yerleştirilmiş zil tipi transdüser ile hazırlanmış deney düzeneği	76
<b>6.9.</b>	Sıkıştırılmalı tip ivme ölçerin gösterimi	76
<b>6.10.</b>	Sinüs fonksiyonu şeklinde titretilim uygulanan bir zil tipi transdüserin çıkışında ölçülen (a) açık devre ve (b) doğrultulmuş voltaj	77
<b>6.11.</b>	Deneyisel çalışmalarda kullanılan elektronik devre	77
<b>6.12.</b>	Zil tipi transdüserlerin performans değerlendirilmesinde kullanılan deney düzeneği	78
<b>6.13.</b>	10 mm çapındaki silindirik bağlantı elemanı ile sarsıcıya bağlanmış olan çerçevenin (a) birinci (676 Hz), (b) ikinci (726 Hz) ve (c) üçüncü (3214 Hz) titreşim modları	80

<b>6.14.</b>	5 mm çapındaki silindirik bağlantı elemanıyla sarsıcıya bağlanmış olan çerçevenin (a) birinci (185 Hz), (b) ikinci (205 Hz) ve (c) üüncü (3211 Hz) titreşim modları	81
<b>6.15.</b>	a) 1.8g, b) 3.6g, c) 5.4g, d) 7.2g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi	83
<b>6.16.</b>	a) 1.8g, b) 3.6g, c) 5.4g, d) 7.2g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi	86
<b>6.17.</b>	C-PZT1 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün frekansa bağlı değişimi	89
<b>6.18.</b>	C-PZT1 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün elektriksel yüke bağlı değişimi	90
<b>6.19.</b>	C-PZT1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen voltaj	90
<b>6.20.</b>	C-PZT1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen akım	91
<b>6.21.</b>	a) 1.8g, b) 3.6g, c) 5.4g, d) 7.2g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi	92
<b>6.22.</b>	a) 1.8g, b) 3.6g, c) 5.4g, d) 7.2g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi	96

<b>6.23.</b>	C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün frekansa bağlı değişimi	99
<b>6.24.</b>	C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün elektriksel yüke bağlı değişimi	99
<b>6.25.</b>	C-PZT2 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen voltaj	100
<b>6.26.</b>	C-PZT2 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen akım	100
<b>6.27.</b>	a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi	101
<b>6.28.</b>	a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi	101
<b>6.29.</b>	C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün frekansa bağlı değişimi	108
<b>6.30.</b>	C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün elektriksel yüke bağlı değişimi	108
<b>6.31.</b>	C-PZNN1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen voltaj	109
<b>6.32.</b>	C-PZNN1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen akım	109
<b>7.1.</b>	Enerji Hasatı Ünitesi	115

7.2.	Sinüs dalgası şeklinde uygulanan titreşim altında iki transdüserli enerji hasatı ünitesinden elde edilen açık devre voltajı	116
7.3.	Deneylerde kullanılan enerji hasatı devresi	116
7.4.	B-PZT1 transdüserinden elde edilen gücün frekans ve uç kütesine bağlı değişimi	118
7.5.	B-PZT1 transdüserinden elde edilen gücün yük empedansı ve uç kütesine bağlı değişimi	118
7.6.	B-PZT1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağlı olarak elde edilen voltaj	119
7.7.	B-PZT1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağlı olarak elde edilen akım	119
7.8.	B-PZT2 transdüserinden elde edilen gücün frekans ve uç kütesine bağlı değişimi	121
7.9.	B-PZT2 transdüserinden elde edilen gücün yük empedansı ve uç kütesine bağlı değişimi	121
7.10.	B-PZT2 transdüserinden frekans ve kütleyle bağlı olarak elde edilen voltaj	122
7.11.	B-PZT2 transdüserinden frekans ve kütleyle bağlı olarak elde edilen akım	122
7.12.	B-PZNN1 transdüserinden elde edilen gücün frekans ve uç kütesine bağlı değişimi	124
7.13.	B-PZNN1 transdüserinden elde edilen gücün yük empedansı ve uç kütesine bağlı değişimi	124

7.14.	B-PZNN1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağı olarak elde edilen voltaj	125
7.15.	B-PZNN1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağı olarak elde edilen akım	125
7.16.	Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ve deneysel sonuçlara (Den.) göre elde edilen rezonans frekansının çubuk kalınlığı ve uç kütlelerine göre değişimi	126
7.17.	Kapasitör üzerinde depolanan enerjinin ölçümü amacıyla kullanılan devre	127
7.18.	Uç kütleli olmayan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi	128
7.19.	Uç kütleli olmayan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F 'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi	129
7.20.	Uç kütleli olmayan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi	130
7.21.	0.17 g'lık uç kütleli olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi	130
7.22.	0.17 g'lık uç kütleli olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi	131
7.23.	0.17 g'lık uç kütleli olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi	131
7.24.	0.34 g'lık uç kütleli olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış 470 $\mu$ F'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi	132

7.25.	0.34 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi	132
7.26.	0.34 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi	133
7.27.	0.51 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi	133
7.28.	0.51 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi	134
7.29.	0.51 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi	134
7.30.	0.68 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi	135
7.31.	0.68 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi	135
7.32.	0.68 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış $470\mu F^2$ lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi	136

## ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1.	Pil çeşitleri ve enerji yoğunluğu karakteristikleri	3
1.2.	Enerji hasatı kaynakları ve yöntemleri	6
1.3.	Enerji hasatı uygulamalarında kullanılacak titreşim kaynakları	7
1.4.	Dönüştürücü mekanizmalar için en yüksek enerji yoğunluğu değerleri	12
1.5.	Titreşimden enerji elde etmek amacıyla kullanılan dönüşüm mekanizmalarının kıyaslanması	12
1.6.	PVDF ve PZT'nin özellikleri	20
1.7.	Çeşitli titreşim kaynakları için titreşim ivmesinin genliği ve temel titreşim modunun frekansı	21
1.8.	Perovskit yapıda kullanılan katkılar	27
1.9.	Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin özellikleri	28
3.1.	Karışık oksit yöntemiyle hazırlanmış PZNN-PZT kompozisyonlarının dielektrik ve piezoelektrik özellikleri	47
5.1.	Sonlu Elemanlar Analizi çalışmasında kullanılan tasarım parametrelerinin değişimi	63
5.2.	Sonlu Elemanlar Analizi çalışmasında kullanılan malzemelerin özellikleri	64
6.1.	Zil tipi transdüserlerde kullanılan piezoelektrik seramik kompozisyonlarının özellikleri	70
6.2.	Deneyel çalışmalarda kullanılan zil tipi transdüserlerin ölçüleri	70
6.3.	Deneyel çalışmada kullanılan zil tipi transdüserlerin özelliklerinin karşılaştırılması	114

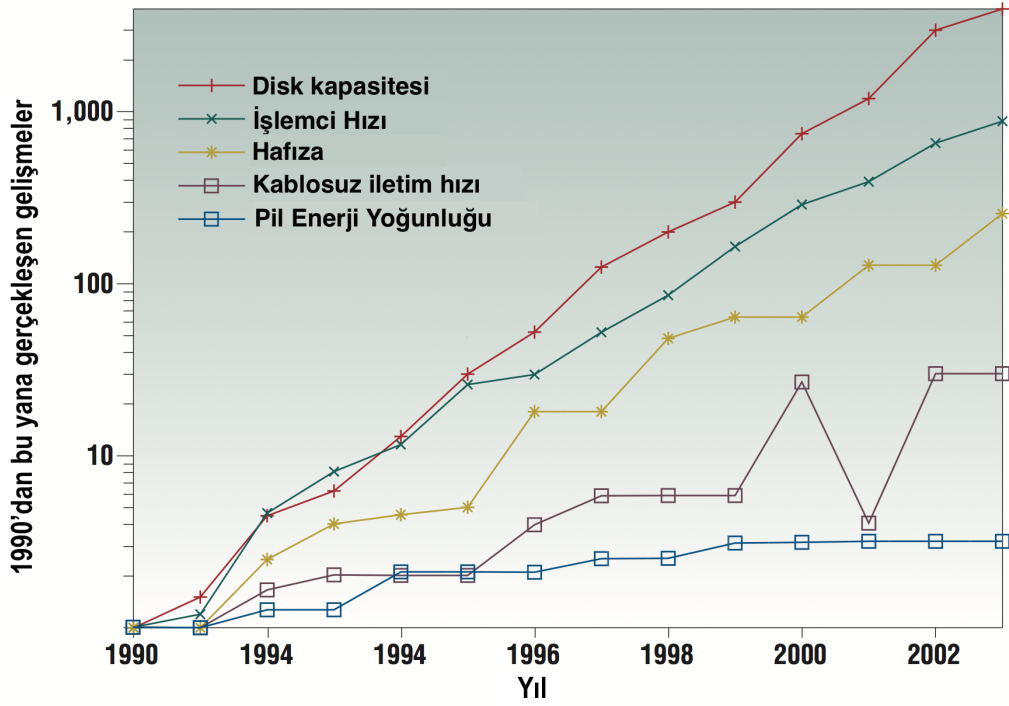
<b>7.1.</b>	B-PZT1 transdüser için uç kütleline bağlı olarak rezonans frekansı ve elde edilen gücün değişimi	117
<b>7.2.</b>	B-PZT2 transdüser için uç kütleline bağlı olarak rezonans frekansı ve elde edilen gücün değişimi	120
<b>7.3.</b>	B-PZNN1 transdüser için uç kütleline bağlı olarak rezonans frekansı ve elde edilen gücün değişimi	123

## 1. GİRİŞ

Elektronik teknolojisindeki ilerlemeler mobil cihazlar ve kablosuz algılayıcı ağlarının güç tüketiminde azalmaya yol açmıştır. Bu tür uygulamalarda birincil enerji kaynakları olarak kullanılan pillerin çok sınırlı kullanım ömrü vardır ve cihazların etkin ömrü boyunca defalarca değiştirilmesi gerekebilir. Değiştirme işlemi çok zaman alıcı olabilir; hatta yapısal sağlık izleme amacıyla kullanılan ve mühendislik yapılarının içine gömülü sensör ağları gibi bazı uygulamalarda ciddi bir zorluk oluşturabilir. Ayrıca "hard disk", CPU ve RAM gibi elektronik bileşenlerin performansları her geçen gün artmaktayken geleneksel pillerin enerji yoğunluğu son yıllarda artış göstermemektedir (Şekil 1.1). Bunun sonucu olarak piller, taşınabilir cihazların ve kablosuz algılayıcı ağlarının gelişiminin önünde bir engel olarak karşımıza çıkmıştır [1]. Lityum iyon pillerin enerji yoğunlukları yaklaşık olarak  $0.9 \text{ kJ/cm}^3$  dolaylarındadır. Bu da demektir ki ortalama 1 mW güç tüketen bir cihazı 10 yıl boyunca besleyebilecek bir pil yaklaşık olarak  $400 \text{ cm}^3$  hacminde olacaktır [2]. Çizelge 1.1'de görüleceği üzere piller kısa dönemler için bir enerji kaynağı olarak çözüm sunabilirler ancak uzun kullanım süreleri için başka çözümler bulunması gerekmektedir.

Son yıllarda elektronik cihazların güç tüketimi önemli ölçüde azalmıştır. Bunun sonucu olarak enerji hasatı (EH) sistemleri tarafından üretilen düşük güç değerleri bu cihazların ihtiyaçlarını karşılayabilecek duruma gelmiştir. Böylece EH sistemlerinin, birincil enerji kaynakları olarak, pillerin yerini alabileceği düşüncesiyle bu konudaki araştırmaların sayısı hızla artış göstermiştir. Güneş, rüzgar, ısıl gradyan ve titreşim EH konusundaki bu çalışmaların odağını oluşturmaktadır.

Güneş panelleri kullanılarak yapılan enerji hasatı [3, 4] uygulamaları genellikle yapay ışık kaynaklarını kullanmak üzere tasarlanmaktadır. Tek kristalli güneş panelleri yapay ışık kaynakları söz konusu olduğunda %1-3 gibi düşük verimlilik göstermektedirler [3]. Yine de güneş panelleri en az  $0.5-1 \text{ mW/cm}^2$  gibi bir güç yoğunluğuna sahiptirler. Yu ve Yue [4] en yüksek güç miktarını tespit edip kullanıma sunan bir devre oluşturmuşlardır. Bu devre bir enerji depolama devresi,



Şekil 1.1: 1990-2003 yılları arasında bilgisayar bileşenlerindeki gelişmeler

bir anlık enerji boşaltma devresi ve bir DC-DC çeviriciden oluşmaktadır. Devrenin prototipi iç mekan ışıklandırması altında  $72.74 \mu\text{W}$  güç hasat etmeyi ve bu güç ile her bir çevrimde  $105 \text{ mW}$  güç tüketen kablosuz bir sıcaklık ve nem sensörünü beslemeyi başarmıştır.

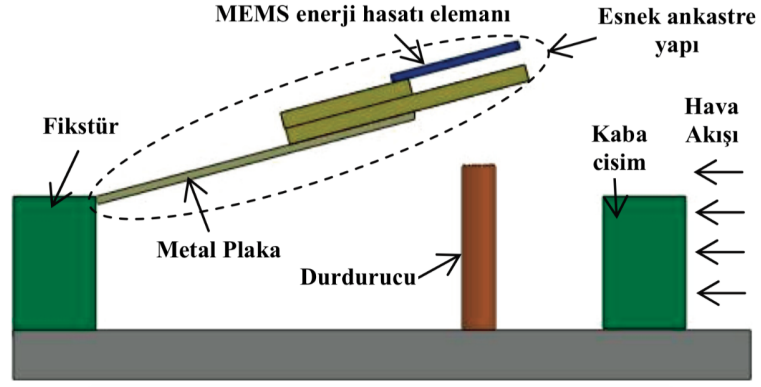
Küçük ölçekli rüzgar enerjisi uygulamalarında genellikle elektromanyetik [5, 6] ya da piezoelektrik [7, 8] dönüşüm mekanizmaları kullanılmaktadır. Genellikle iki çeşit tasarım üzerine yoğunlaşmıştır; 1) rüzgar kayışı enerji hasatı sistemi ve 2) Helmholtz rezonatörü esaslı enerji hasatı sistemi [6].

Fei ve arkadaşları [5] esnek bir kayış ve bir elektromanyetik rezonatörden oluşan enerji hasatı ünitesi tasarlamışlardır. Bu enerji hasatı ünitesi  $3 \text{ m/s}$  rüzgar hızında yaklaşık  $7 \text{ mW}$  elektriksel güç üretmeyi başarmıştır. He ve Gao [7] ise darbe ile çalışan bir enerji hasatı sistemi üzerinde çalışmışlardır. Bu enerji hasatı ünitesi ince bir metal plaka, bir piezoelektrik MEMS hasat elemanı, bir rijid durdurucu ve kesiti akış doğrultusuna dik bir cisimden oluşmaktadır (Şekil 1.2).  $15.9 \text{ m/s}$  hıza ulaşan rüzgar ile elde edilen güç  $1.6 \mu\text{W}$  olarak kaydedilmiştir.

**Çizelge 1.1:** Pil çeşitleri ve enerji yoğunluğu karakteristikleri

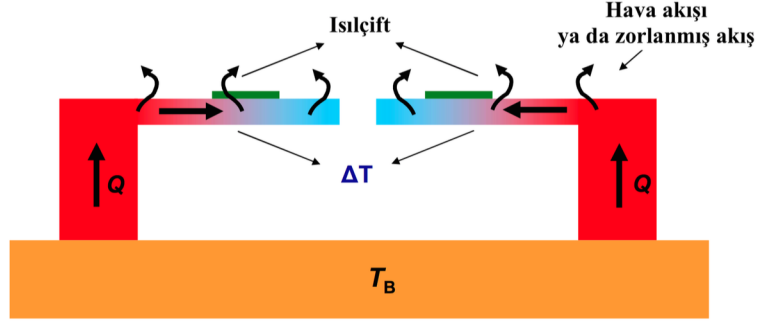
Pil Tipi	Maliyet (USD/Wh)	Özgül Enerji (Wh/kg)	Özgül Enerji (J/kg)	Enerji Yoğunluğu (Wh/litre)
Kurşun-Asit	0.17	41	146000	100
Uzun Ömürlü Alkali	0.19	110	400000	320
Karbon-Çinko	0.31	36	130000	92
NiMH	0.99	95	340000	300
NiCad	1.50	39	140000	140
Lityum-İyon	0.47	128	460000	230

Isıl gradyanlardan faydalanarak enerji hasatı yapabilmek için Seebeck etkisi kullanılmaktadır [9–12]. Seebeck etkisi, sıcaklık farkının bir malzeme çifti yardımıyla elektriksel potansiyel farkına dönüştürülmesini sağlamaktadır. Termoelektrik cihazların boyutlarının küçültülmesi oldukça umut vadeden bir konu haline dönüşmüştür. Zira yüksek yoğunlukta malzeme çiftleri küçük bir cihaz içerisine sığdırılarak küçük sıcaklık farklarıyla yüksek voltajlar elde etmek mümkün olmaktadır [9]. Dalola ve Ferrari [10] yaptıkları çalışmada yenilikçi bir termoelektrik mikro üretici imal etmişlerdir (Şekil 1.3). Bu üretici ile  $1.1 \times 10^{-8} \mu\text{W}/\text{K}^2$  güç üretmeyi başarmışlardır. Dávila ve arkadaşları [11] ısı gradyanlardan faydalanarak elektrik enerjisi üretmek maksadıyla silisyum nanoteller kullanmışlardır. Ürettikleri termo elemanların  $\Delta T = 300^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı için 60 mV'a ulaşan Seebeck voltajı ve  $1.44 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 'lik güç yoğunluğuna ulaştığını bildirmişlerdir. Tek bir termoeleman için enerji hasatı verileri incelendiğinde  $\Delta T = 27^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklık farkı için 4.4 mV'luk Seebeck voltajı ve  $9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 'lik güç yoğunluğu tespit edilmiştir. Sodano ve arkadaşları, Şekil 1.4'te görülen ve Seebeck etkisi üzerine temellenmiş olan termoelektrik enerji hasatı sistemini önermişlerdir [12]. Bu sistem ile  $200^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki bir yüzeyin üzerine

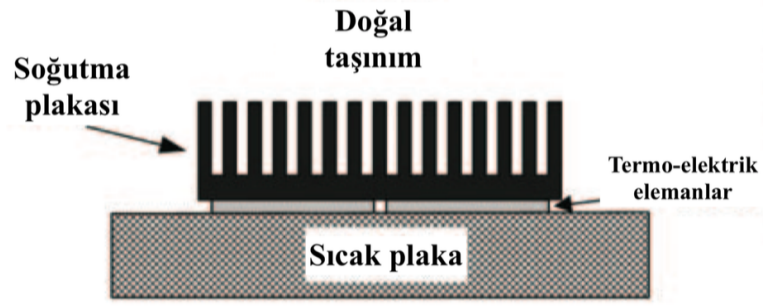


Şekil 1.2: Darbe esasına göre çalışan enerji hasatı sistemi [7]

yerleştirildiğinde ve taşınım ile ısı transferi olmadan, 40 mW'lık güç üretmeyi başarmışlardır.



Şekil 1.3: Dalola ve Ferrari tarafından önerilen termoelektrik enerji hasatı sistemi [10]



**Şekil 1.4:** Sodano ve ark. tarafından önerilen termoelektrik enerji hasatı sistemi [12]

Titreşimden enerji hasatı uygulamaları için en yaygın teknikler manyetostriktif [13], kapasitif [14], elektromanyetik [15–18] ve piezoelektrik [19–21] olarak sıralanabilir.

Roundy ve arkadaşları [22] enerji hasatı metodları ve bu metodlarla ulaşılabilecek enerji yoğunluklarını vermiştir. (Çizelge 1.2).

**Çizelge 1.2:** Enerji hasatı kaynakları ve yöntemleri [22]

Enerji Kaynağı	Güç Yoğunluğu ( $\mu W/cm^3$ ) (1 Yıllık Ömür)	Güç Yoğunluğu ( $\mu W/cm^3$ ) (10 Yıllık Ömür)
Güneş (dış mekan)	15000-Doğrudan güneş 150-Bulutlu gün	15000-Doğrudan güneş 150-Bulutlu gün
Güneş (İç mekan)	6-Ofis masası	6-Ofis masası
Titreşim (Piezoelektrik Dönüşüm)	250	250
Titreşim (Elektrostatik Dönüşüm)	50	50
Akustik gürültü	0.003 at 75 dB 0.96 at 100 dB	0.003 at 75 dB 0.96 at 100 dB
Isıl gradyan	15-15°C gradyanda	15-15°C gradyanda
Ayakkabı tabanı	330	330
Piller (şarj edilemeyen lityum)	45	3.5
Piller (şarj edilebilen lityum)	7	0
Hidrokarbon yakıt (Mikro ısı makinası)	333	33
Yakıt hücresi (Metanol)	280	28

Bu anlamda "güç hasatı" ve "enerji hasatı" terimleri birbiri yerine kullanılmaktadır. Fizikte enerji, bir kuvvet tarafından gerçekleştirilen iş, güç ise işin yapılma hızı

olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçları kıyaslarken, güç hasatı ve enerji hasatı terimleri dikkatle kullanılmalıdır.

### 1.1 Titreşimden Enerji Hasatı Metodları

Motorlu taşıtlar, mühendislik yapıları ve endüstriyel makinalar birçok yerde titreşime sebep olmaktadır. Titreşimden enerji hasatı, basitçe bu titreşim enerjisini elektriksel enerjiye çevirerek depolamak anlamına gelmektedir. Titreşime neden olan kaynaklar Çizelge 1.3’de verilmiştir.

**Çizelge 1.3:** Enerji hasatı uygulamalarında kullanılabilecek titreşim kaynakları [23]

Taşıtlar	Yapılar	Endüstri	Çevre
Uçak	Köprüler	Motorlar	Okyanus akıntıları
Helikopter	Yollar & Demiryolları	Kompresörler	Akustik dalgalar
Otomobil	Tüneller	Pompalar	Rüzgar
Tren	Havalandırma ve iklimlendirme sistemleri	Titreşen Makinalar	
	Kanallar	Fanlar	

Bu kaynakların titreşim karakteristikleri çoğunlukla periyodik bir yapı sergilemektedir. Titreşim, bir kütleye doğrudan uygulanan bir kuvvet şeklinde oluşturulabileceği gibi bir yapının bağlı olduğu temelin hareketiyle de gerçekleşebilir [24–27]. Uygulanan periyodik kuvvet,  $F(t)$ , şu şekilde verilebilir;

$$F(t) = F_0 \sin \omega t \quad (1.1)$$

Burada  $F_0$  titreşimin genliğini ve  $\omega$  titreşimin açısal frekansını (rad/s) verir. Bir enerji hasatı ünitesinin (Şekil 1.6) temeline uygulanan titreşimin hareketinin deplasmanı,  $y(t)$ , şu şekilde verilebilir;

$$y(t) = y_0 \sin \omega t \quad (1.2)$$

Burada  $y_0$  titreşim deplasmasının genliğidir. Oluşan tepki iki şekilde ifade edilebilir:

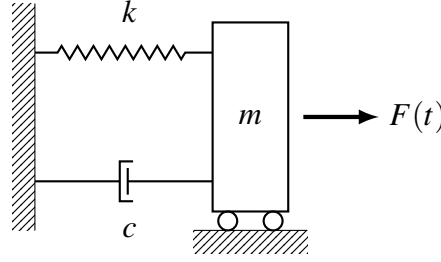
1. Eğer tahrik, bir kütleye uygulanan kuvvet,  $F(t)$ , ise (Şekil 1.5), sistem cevabı

(a) kütle hareketinin genliği ya da

(b) uygulanan kuvvetin genliğinin sisteme iletilme oranı (kuvvet iletilirliği)

şeklinde ifade edilebilir.

2. Eğer tahrik, sistemin bağlı olduğu bir temelin hareketi şeklindeyse (Şekil 1.6), sistem cevabı çoğunlukla kütle hareketinin temelin hareketine oranı şeklinde ifade edilir (hareket iletilirliği) [24].

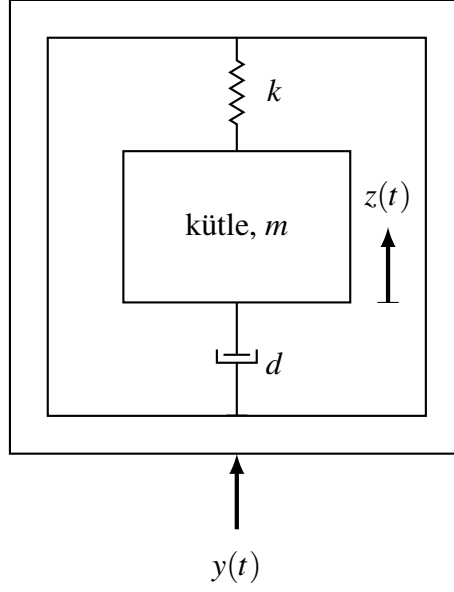


**Şekil 1.5:** Kütleye uygulanan kuvvet ile tahrik edilen tek serbestlik dereceli sistem

Enerji hasatı sistemleri Şekil 1.5’de görüldüğü gibi bir kütleye uygulanan kuvvet ile tahrik edilen [27–30] ya da Şekil 1.6’da görüldüğü gibi sistemin bağlı olduğu bir temele uygulanan kuvvet ile tahrik edilen [22, 25, 31–34] tek serbestlik dereceli bir yay-kütle-sönümleyici sistemi olarak modellenmektedir. Şekil 1.5’te verilen sistemin titreşim hareketinin diferansiyel denklemi

$$m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \sin\omega t \quad (1.3)$$

Sönümlenmiş bir sistemde Eşitlik 1.3’ün çözümünde doğal frekanstaki titreşim terimleri bulunmaz. Hareket, uygulanan kuvvetin frekansında ( $\omega$ ) oluşur. Sistemin cevabı



**Şekil 1.6:** Sistemin temelne uygulanan kuvvet ile tahrik edilen tek serbestlik dereceli sistem

$$x = R \sin(\omega t - \theta) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilir. A ve B t=0 anında sırasıyla kütlenin hızı ve deplasmanı kullanılarak belirlenir. Eşitlik 1.4'ü Eşitlik 1.3'te yerine koyduğumuzda

$$\frac{x}{F_0/k} = \frac{\sin(\omega t - \theta)}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_n^2) + (2\zeta \omega/\omega_n)^2}} \quad (1.5)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $\zeta$  sönümlenme katsayısıdır ve

$$\zeta = \frac{d}{2m\omega_n} \quad (1.6)$$

olarak verilir. Burada  $\omega_n$  sistemin doğal frekansıdır ve

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.7)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu denklemde  $\theta$  faz açısıdır ve şu şekilde yazılır:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta \omega/\omega_n}{1 - \omega^2/\omega_n^2} \right) \quad (1.8)$$

Boyutsuz bir cevap faktörünü ( $R_d$ ) şu şekilde tanımlayabiliriz

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_n^2) + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}} \quad (1.9)$$

Boyutsuz cevap faktörü,  $R_d$ , titreşim deplasmasının genliğinin, yay-kütle-sönümleyici sistemdeki yayın deplasmanına oranıdır. Çok düşük frekanslarda  $R_d$  yaklaşık olarak 1'e eşittir;  $\omega_n$ 'e yaklaştıkça pik yapacak şekilde artar ve  $\omega$  çok arttığında da sifıra yaklaşır [24]. Çok düşük tahrik frekansları için deplasman cevabı ( $x$ ) şu şekilde ifade edilir:

$$x \simeq \left(\frac{F_0}{k}\right) \sin\omega t \quad (1.10)$$

Rezonans durumunda ( $\omega = \omega_n$ ) Eşitlik 1.10 aşağıdaki şekilde yazılır.

$$x = \frac{F_0}{2k\zeta} \sin\left(\omega_n t + \frac{\phi}{2}\right) = -\frac{F_0}{d\omega_n} \cos\omega_n t \quad (1.11)$$

İncelenmesi gereken son durum ise tahrik frekansının çok yüksek olduğu durumdur ve deplasman cevabı bu durumda şöyle ifade edilmektedir:

$$x = \frac{\omega_n^2 F_0}{\omega^2 k} \sin(\omega_n t + \phi) = \frac{F_0}{m\omega^2} \sin\omega_n t \quad (1.12)$$

Enerji hasatı sistemi, Şekil 1.6'te görüldüğü gibi, bir muhafaza içerisine yerleştirilmiş tek serbestlik dereceli bir yay-kütle-sönümleyici sistemi olarak da düşünülebilmektedir [25, 34]. Bu sistem için hareket denklemi şu şekilde verilir;

$$m\ddot{z}(t) + d\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1.13)$$

Burada  $z(t)$  kütleinin, muhafazaya göre izafi hareketini,  $m$  kütle,  $d$  sönümleme katsayısını ve  $k$  da yay katsayısını ifade etmektedir. Üretilen net elektriksel güç ( $P$ );

$$P = \frac{m\zeta Y_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right]^2} \quad (1.14)$$

olarak verilmektedir [25, 27]. Eşitlik 1.14'te görüldüğü üzere en yüksek güç, rezonans frekansına yakın frekanslarda ( $\omega = \omega_n$ ) elde edilmektedir ve

$$P = \frac{m\omega_n^3 Y_0^2}{4\zeta} \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan da anlaşılacağı üzere en yüksek gücü elde edebilmek için sistemin düşük sönümlenme katsayısına ( $\zeta$ ) sahip olması gerekir. Bunun aksine, yüksek sönümlenme katsayısına sahip sistemlerin daha geniş bir bant aralığında enerji hasatı yapabilmeye imkanı bulunmaktadır [27].

Eşitlik 1.15 şu şekilde de ifade edilebilmektedir:

$$P = \frac{mA^2}{4\omega\zeta} \quad (1.16)$$

Eşitlik 1.16'dan anlaşılacağı üzere, elde edilen güç frekans ve sönümlenme katsayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Buradan hareketle Roundy ve ark., titreşim ivmesinin genliği sabit tutulduğunda, en yüksek miktarda gücü elde edebilmek için sistemin rezonans frekansının mümkün olan en düşük frekansa ayarlanacak şekilde tasarlanması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır [22].

Beeby ve arkadaşları [33] mekanik enerjiden elektriksel enerjiye dönüşüm mekanizmalarını iki başlık altında sınıflandırmışlardır; 1) mekanik gerinme yoluyla ve 2) sistem içerisinde bağlı yer değiştirme yoluyla. Mekanik gerinme mekanizmasını kullanarak enerji hasatı yapmak aktif malzemeleri (piezoelektrik malzemeler gibi) kullanmak ile mümkündür. Bağlı yer değiştirme mekanizmasıyla enerji hasatı için ise hız ve pozisyon gibi veriler dikkate alınmaktadır. Elektromanyetik dönüştürücülerde hız en önemli parametre iken elektrostatik dönüştürücülerde pozisyon en önemli değişken olarak karşımıza çıkmaktadır. Roundy ve Wright [35], bu üç dönüştürücü çeşidi için enerji yoğunluğu değerlerini karşılaştırmışlardır. Kim ve arkadaşları [6], bu dönüşüm mekanizmalarını öne çıkan özellikleri ile değerlendirmişlerdir (Çizelge 1.5).

**Çizelge 1.4:** Dönüştürücü mekanizmalar için en yüksek enerji yoğunluğu değerleri [35]

Type	Enerji Yoğunluğu ( $mJ cm^{-3}$ )	Eşitlik	Kabuller
Piezoelektrik	35.4	$(1/2)\sigma_y^2 k^2 / 2c$	PZT 5H
Elektromanyetik	24.8	$(1/2)B^2 / \mu_0$	0.25 T
Elektrostatik	4	$(1/2)\epsilon_0 E^2$	$3 \times 10^7 V m^{-1}$

**Çizelge 1.5:** Titreşimden enerji elde etmek amacıyla kullanılan dönüşüm mekanizmalarının kıyaslanması [6]

Tip	Avantaj	Dezavantaj
Piezoelektrik	- Voltaj kaynağına ihtiyaç duymaz - Yüksek voltaj çıkışı	- Entegrasyon
Elektromanyetik	- Voltaj kaynağına ihtiyaç duymaz - Entegrasyon - Düşük Maliyet - Süreç uyumluluğu	- Düşük voltaj çıkışı
Elektrostatik	- Entegrasyon	- Voltaj kaynağına ihtiyaç duyar - Uygulamada enerji üst sınırı vardır

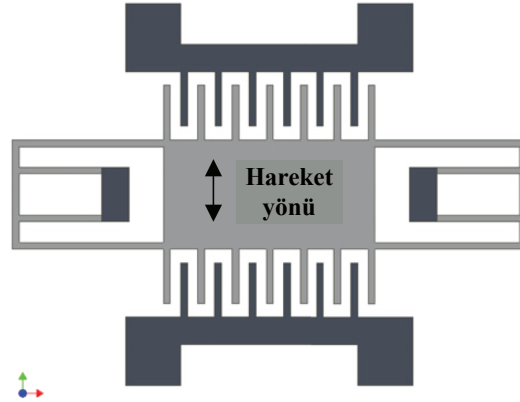
### 1.1.1 Elektrostatik Enerji Hasatı

Elektrostatik (kapasitif) enerji hasatı yöntemi, ilk anda yüklü olan bir varaktörün paralel plakaları arasındaki mesafenin, titreşime bağlı olarak, değişmesi sonucu varaktörün kapasitansının değişmesi ilkesine dayanmaktadır [36]. Paralel plakalar arasındaki elektrostatik kuvvete karşı yapılan iş hasat edilen enerjiye eşittir [33]. Kapasitörlerin bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duyuyor olması bu sistemlerin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır (Table 1.5). Bias voltajının çok dikkatli bir şekilde ayarlanması hatta çoğu durumda sistemin, elektret gibi uzun ömürlü bir elektriksel yük kaynağına bağlanması ve elektronik paketlemenin hava geçirmez olması gerekmektedir [6, 14, 37].

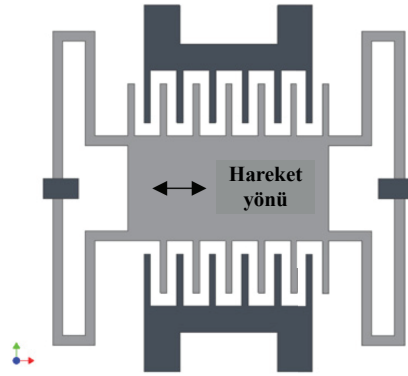
Roundy [38], Roundy ve ark. [39] ve Beeby ve ark. [33] elektrostatik esaslı enerji hasatı sistemlerini üç sınıfta incelemişlerdir. Bunlar düzlem içi örtüşmeli, düzlem içi boşluk kapamalı ve düzlem dışı boşluk kapamalıdır. Bu elektrostatik enerji hasatı tasarımları Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Roundy ve ark. bu üç tasarımı elektriksel güç yoğunluklarına göre kıyaslamışlardır [39]. En yüksek güç yoğunluğu düzlem içi boşluk kapamalı enerji hasatı ünitesi tasarımı ile elde edilirken en düşük güç yoğunluğu da düzlem içi örtüşmeli elektrostatik enerji hasatı ünitesinde karşımıza çıkmaktadır. Yapılan simülasyonların sonucunda düzlem içi boşluk kapamalı dönüştürücülerden 120 Hz frekansta  $2.25 \text{ m/s}^2$  genlikli titreşimler altında  $116 \mu\text{W/cm}^3$  güç yoğunluğu elde edilebileceği belirlenmiştir.

Meninger [40] mekanik titreşimleri elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla kullanılmak üzere bir MEMS değişken kapasitör önermiş ve bir düzlem içi örtüşmeli değişken kapasitör kullanmıştır. Bu sistemle 2.5 kHz frekansta  $8 \mu\text{W}$  kullanılabilir güç elde etmeyi başarmıştır.

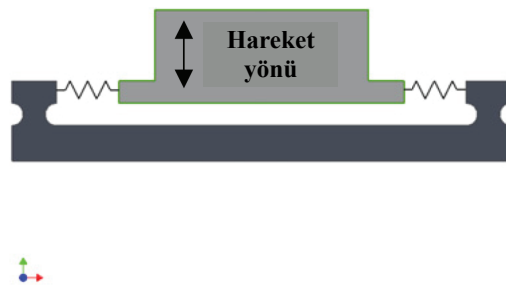
Despesse ve ark. [41] düzlem içi boşluk kapamalı tipte bir dönüştürücü ile 50 Hz frekansta ve  $90 \mu\text{m}$  titreşim genliğinde  $1052 \mu\text{W}$  güç üretmişlerdir. Kuehne ve ark. düzlem dışı boşluk kapamalı bir MEMS elektrostatik enerji hasatı ünitesi ile yaptıkları çalışmada sayısal simülasyonlar sonucunda 1 kHz frekansta ve  $0.2 \text{ g}$  ( $1\text{g} = 9.8\text{m/s}^2$ ) genlikteki titreşim altında  $4.28 \mu\text{W}$  güç elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.



(a)



(b)

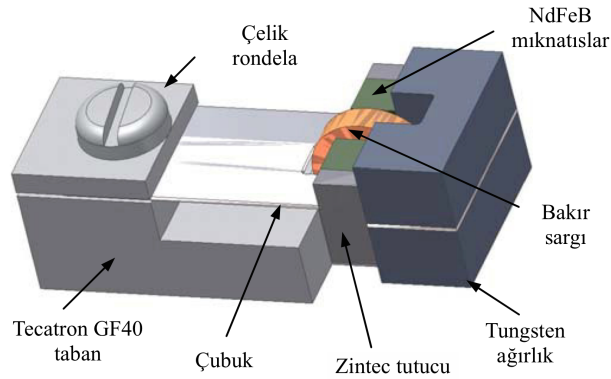


(c)

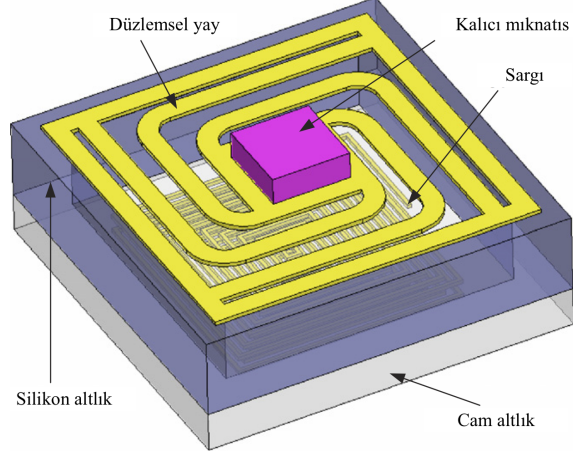
**Şekil 1.7:** Elektrostatik-esaslı enerji hasatı tasarımları; a) Düzlem içi örtüşmeli, b) Düzlem içi boşluk kapamalı and c) Düzlem dışı boşluk kapamalı [33, 38, 39]

### 1.1.2 Elektromanyetik Enerji Hasatı

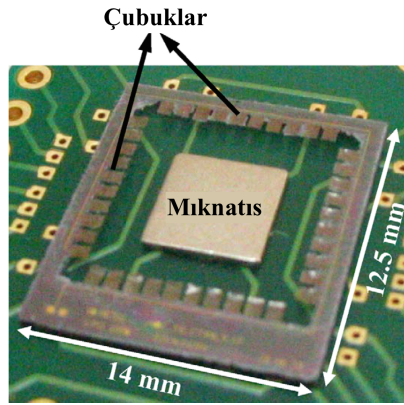
Elektromanyetik enerji hasatı sistemleri, bir elektriksel iletkenin bir manyetik alana göre izafi hareketinden faydalanarak elektrik enerjisi üretirler. kullanılan iletken genellikle bir bobindir. Mıknatıslar da elektromanyetik induksiyonu yaratmak için kullanılır. Dönüşümün verimi, titreşim hareketinin hızına, manyetik alanın gücüne ve iletken bobindeki sargı sayısına bağlıdır. Glyenne-Jones ve ark. [16], bir otomobilin motor bloğuna bağlı ve iki mıknatıs arasında hareket eden bir bobinden oluşan elektromanyetik enerji hasatı sistemi ile  $157 \mu\text{W}$  ortalama güç üretmeyi başarmışlardır. Beeby ve ark. [15] titreşimlerden elektrik enerjisi üretebilmek amacıyla dört adet NdFeB mıknatısın ortasında bir kirişe bağlı olarak hareket eden bir bobinden oluşan enerji hasatı düzeneğini kullanmışlardır. Bu düzenek ile 52 Hz frekansta ve  $0.59 \text{ m/s}^2$  ivme genliğinde  $46 \mu\text{W}$  elektriksel güç üretmeyi başarmışlardır. Söz konusu düzenek Şekil 1.8’de görülmektedir. Wang ve ark. [42] bir NdFeB mıknatıs, bir düzlemsel bakır yay ve iki tabakalı bir bakır folyodan oluşan bir MEMS elektromanyetik üretici imal etmişlerdir (Şekil 1.9). Enerji hasatı ünitesi 121.25 Hz frekansta  $60 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  voltaj üretmiştir. Sarı ve ark. [43] yine bir MEMS elektromanyetik enerji hasatı ünitesi üretmişlerdir (Şekil 1.10). Bu ünite 1 kHz’lik bir frekans aralığında  $0.4 \mu\text{W}$  güç üretebilen 40 adet çubuktan oluşmaktadır.



**Şekil 1.8:** Dört mıknatıslı elektromanyetik enerji hasatı tasarımı [15]



**Şekil 1.9:** Bir NdFeB mıknatıs, bir düzlemsel bakır yay ve iki tabakalı bir bakır folyodan oluşan MEMS elektromanyetik enerji hasatı ünitesi [42]



**Şekil 1.10:** 40 adet çubuk ve bir mıknatıstan oluşan MEMS elektromanyetik enerji hasatı ünitesi [43]

### 1.1.3 Piezoelektrik Enerji Hasatı

Titreşimden enerji etmekte en yaygın kullanılan yöntemlerden biri piezoelektrik malzemeleri kullanarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu konudaki en eski çalışmalardan biri Häsler ve arkadaşları [44] tarafından ortaya atılmış olan ve bir köpeğin göğüs kafesine yerleştirilen piezoelektrik bir implant yardımıyla enerji hasatı gerçekleştirmeyi öngören çalışmadır. Çalışma sonucunda  $17\mu W$ 'lık bir güç elde edilmiştir.

Piezoelektrik malzemeleri kullanarak insan vücudunun çeşitli bölgelerinden enerji elde etme (Şekil 1.11); bu enerjiyi giyilebilir ve kablosuz veri iletebilir bilgisayarlarda kullanma fikrini ele alan Starner [45] ayakkabı içine yerleştirilmiş bir piezoelektrik polimer (PVDF) taban ile 52 kg. ağırlığında bir insanın 5 W elektriksel güç üretebileceğini öngörmüştür. Bu uygulama aynı zamanda ayakkabı tasarımına her koşulda uyum sağlayabilecek esnek bir yapıya sahip olduğu için maliyet açısından da avantajlıdır. Starner aynı zamanda giyilebilir ve kablosuz bağlantı kurabilir nitelikte klavyelerin de veri iletebilmek için ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin, klavye tuşlarına basıldığında uygulanan basıncın piezoelektrik etki ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi sonucu elde edilebilir olduğunu vurgulamıştır. Bu tip uygulamalarda kullanılması önerilen piezoelektrik polimer malzeme ile PZT'nin temel bazı özelliklerinin karşılaştırılması da Starner tarafından yapılmıştır (Çizelge 1.6). PVDF akustik empedans uyumu açısından avantajlı olmasına rağmen piezoelektrik özellik açısından PZT seramikler açık ara öndedir. Empedans uyumu sağlayabilecek sistemlerin geliştirilmesiyle PZT seramiklerden çok daha fazla verim alınabilir. Piezoelektrik yük sabitesi ( $d_{ij}$ ) ve piezoelektrik voltaj sabitesinin ( $g_{ij}$ ) enerji hasatı uygulamalarında en etkin faktörler olduğu göz önüne alındığında PZT'nin PVDF'e göre bir çok durumda daha avantajlı olduğu görülebilmektedir.

1997 yılında Umeda ve arkadaşları [46] 5.6 gr. ağırlığında bir çelik bilyanın 27 mm. çapında, 0.25 mm. kalınlığında bir bronz disk ve 19 mm. çapında, 0.25 mm. kalınlığında bir piezoelektrik seramikten oluşan kompozit yapının üzerinde zıplatılmasıyla elektrik üretmeyi başarmış ve % 35 gibi bir verime ulaşmışlardır

ki bu verim o sırada kullanılmakta olan güneş hücresinin veriminin 3 katından daha fazladır. Bu çalışmada Umeda ve arkadaşları aynı zamanda, enerji hasatı devresinin bileşenlerinin de elde edilen enerji açısından oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir.

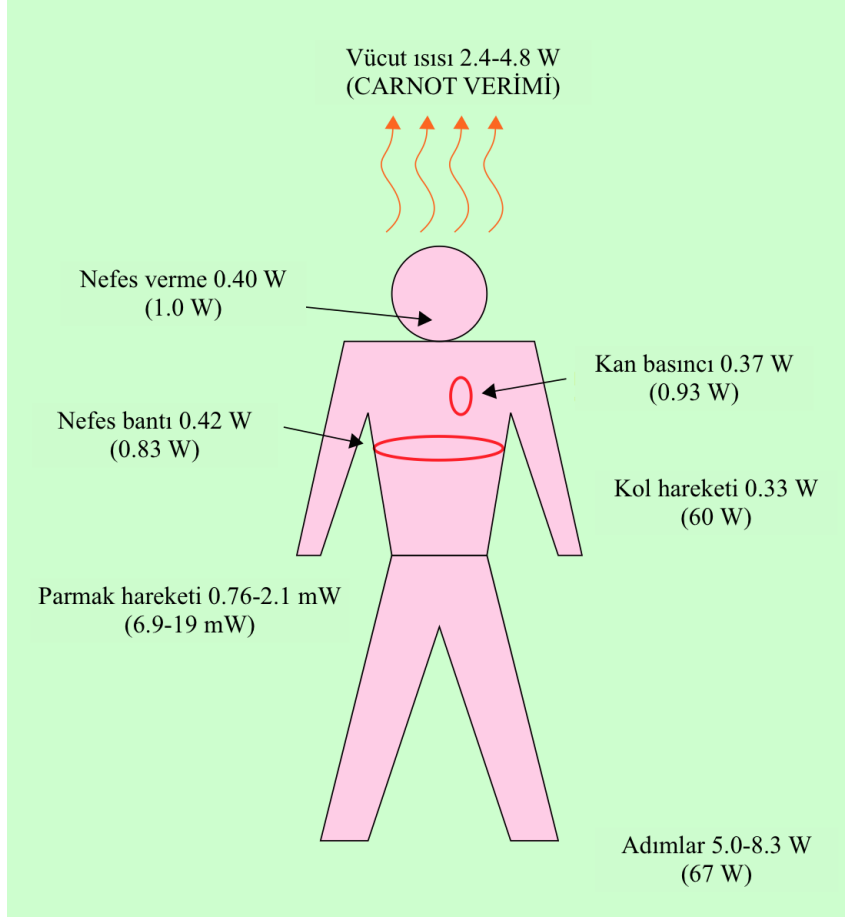
Enerji hasatı ile anlık üretilen enerjinin birçok cihaz için yeterli olmadığı ve bu enerjinin ancak depolanarak kullanıldığı takdirde yaygın uygulama alanı bulabileceği görülmüştür. Buradan hareketle, enerji hasatı uygulamalarında elde edilen verimin, kullanılan malzemeler kadar, süreç sırasında elde edilen alternatif akımı pillerde depolanabilecek olan doğru akıma dönüştüren ve depolayan devre elemanlarına da büyük ölçüde bağlı olduğu kavranmıştır.

Bu gelişmelerin ışığında enerji hasatı konusunda ticari ürünlerin tasarım ve üretim çalışmaları başlatılmıştır. Kurşun zirkonat titanat (PZT) fiber ve polimer matris ile oluşturulan ticari kompozit malzemeler kullanılarak 22 Hz frekanslı ve 1.4 mm. genlikli bir titreşim ortamında 125 mW kesintisiz güç elde etmenin mümkün olabileceği belirlenmiştir [47].

2006 yılında yaptıkları çalışmada Minazara ve arkadaşları bir PZT-pirinç diyafram transdüser kullanarak 1.71 kHz titreşim frekansında 0.65 mW güç üretebildiklerini göstermişlerdir [2]. Söz konusu çalışmadaki önemli bir başka tespit ise SSHI (synchronized switch harvesting on inductor) tekniği kullanılarak, üretilen enerjinin rezonans frekansında yaklaşık 3 katına (1.7 mW) çıkmasıdır. Bu da kullanılan teknik ve tasarımın - ki bu çoğu zaman sistem içerisinde dönüştürücü ve depolayıcı işlevine sahip elektronik devrenin tasarımıdır - enerji hasatı uygulamalarında ne denli önemli olduğunu bir kere daha ifade etmiştir.

Bu gerçekten hareketle 2002 yılında Ottman ve arkadaşları [48] DC/DC dönüştürücü ve bir kontrol algoritması kullanarak değişken titreşim davranışlarına uyum sağlayan (adaptif) bir piezoelektrik enerji hasatı devresi oluşturmuşlardır. Bu tür sistemler öngörülen titreşim karakteristiğine göre iyileştirilebilecek tasarımları olanaklı kılmaktadır.

Titreşim kaynaklarından enerji hasatı çalışmalarına paralel olarak akışkanların kinetik enerjilerini elektrik enerjisine piezoelektrik malzemeleri kullanarak dönüştürme çalışmaları da son yıllarda yoğunluk kazanmıştır. Kapsamlı



**Şekil 1.11:** İnsan vücudunun değişik bölgelerinden hasat edilebilecek enerji miktarları (söz konusu bölgenin toplam gücü parantez içinde verilmiştir) [45]

çalışmalardan ilki Taylor ve arkadaşları tarafından [49], akış sırasında yapının önünde bulunan bloğun oluşturduğu vorteksin, piezoelektrik levhaları hareket ettirmesi prensibine dayanılarak inşa edilmiş olan Şekil 1.12'deki enerji hasat ünitesidir. Sebastian Pobering ve Norbert Schwesinger 2004 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada [50] PZT (kurşun zirkonat titanat) bimorph yapıları su akışı içerisinde kullanarak  $68.1 \text{ W/m}^3$  güç yoğunluğu elde edilebileceğini göstermişlerdir. Rüzgar türbinleri ile elde edilebilecek güç yoğunluğu ise ancak  $34 \text{ W/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sistemlerin bir avantajı da hareketli parçalara sahip olmamaları, dolayısıyla bakıma gerek duymayacak cihazların tasarımını imkanı hale getirmeleridir. Ayrıca piezoelektrik transduserler çalışmaları için dışarıdan bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymamaları sebebiyle,

**Çizelge 1.6:** PVDF ve PZT'nin özellikleri [45]

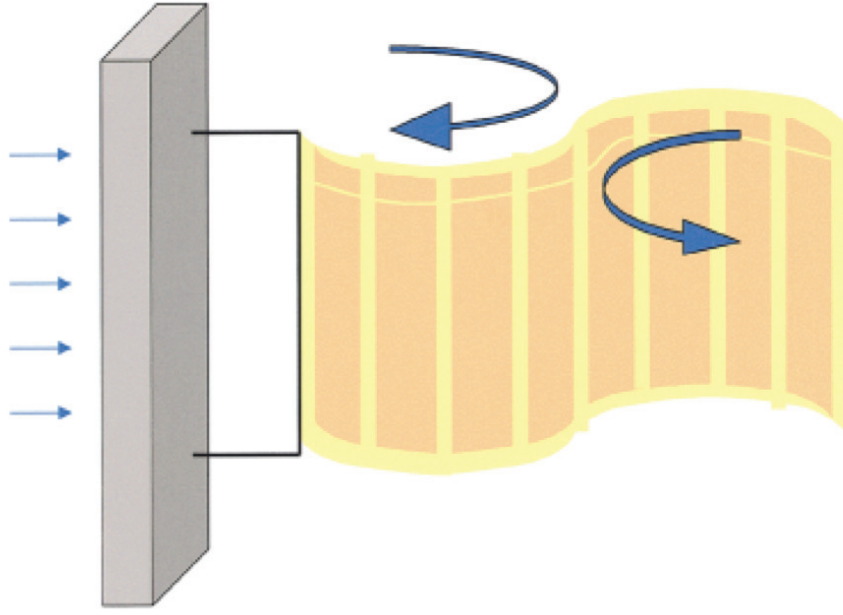
Özellik	Birim	PVDF	PZT
Yoğunluk	$\frac{g}{cm^3}$	1.78	7.6
Bağıl geçirgenlik	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	12	1700
Elastik Modül	$10^{10} \frac{N}{m}$	0.3	4.9
Piezoelektrik Yük Sabitesi	$10^{-12} \frac{C}{N}$	$-d_{31} = 20$ $d_{33} = 30$	$-d_{31} = 180$ $d_{33} = 360$
Bağlaşma Sabitesi	$\frac{CV}{Nm}$	0.11	$k_{31} = 0.35$ $k_{31} = 0.69$

enerji hasatı amacıyla kullanılan elektromanyetik ve elektrostatik transduserlere göre oldukça büyük avantaj sağlamaktadırlar. Günlük yaşantımızda sıkça kullandığımız ürünlerde oluşan titreşimlere bakıldığında bu tür enerji hasatı panellerinin çok farklı uygulamaları da olacağı gözlenmektedir (Çizelge 1.7).

Liu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [51]; ucunda belirli bir kütle bulunan ve PZT bimorfun Pt/Ti elektrotlar arasında bulunduğu Şekil 1.13'deki yapı kullanılmış; bu yapının bağlı bulunduğu cihaz, çevredeki titreşimlerin etkisiyle hareketlendiğinde, elektrik enerjisi elde edilmesi amaçlanmıştır. Burada hareketin genliği arttıkça elde edilen elektrik enerjisi de artar. Oluşacak en büyük genliklerin rezonans frekansında oluşan titreşimlerin genlikleri olduğu bilindiğinden enerji hasatı ünitesinin doğal frekansının bulunduğu çevredeki titreşimlerin frekansı ile rezonans oluşturacak şekilde ayarlanması elde edilecek enerji miktarını da arttıracaktır.

**Çizelge 1.7:** Çeşitli titreşim kaynakları için titreşim ivmesinin genliği ve temel titreşim modunun frekansı [22]

Titreşim Kaynağı	A ( $m/s^2$ )	f
Otomobil motor bölmesi	12	200
3-eksenli işleme tezgahının tabanı	10	70
Mikser haznesi	6.4	121
Çamaşır kurutucusu	3.5	121
Ayağını yere vuran insan	3	1
Otomobil ön konsolu	3	13
Kapı kapandıktan hemen sonra kapı çerçevesi	3	125
Küçük mikrodalga fırın	2.5	121
Ofis binasındaki HVAC menfezleri	0.2-1.5	60
Caddeye bakan pencere	0.7	100
Diz üstü bilgisayarın CD sürücüsü	0.6	75
Ofis binasının ikinci katı	0.2	100

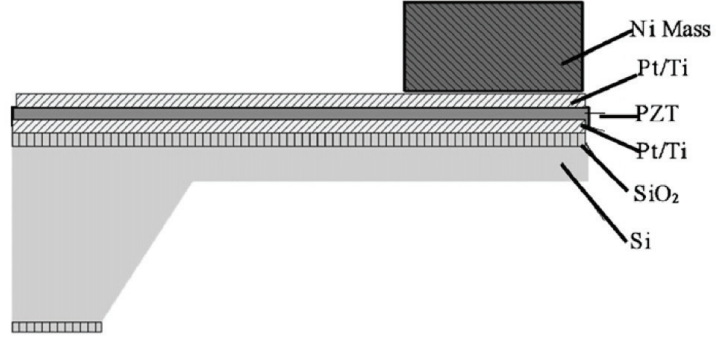


**Şekil 1.12:** Enerji Hasatı için kullanılan "yılanbalığı" yapısının hareketi [49]

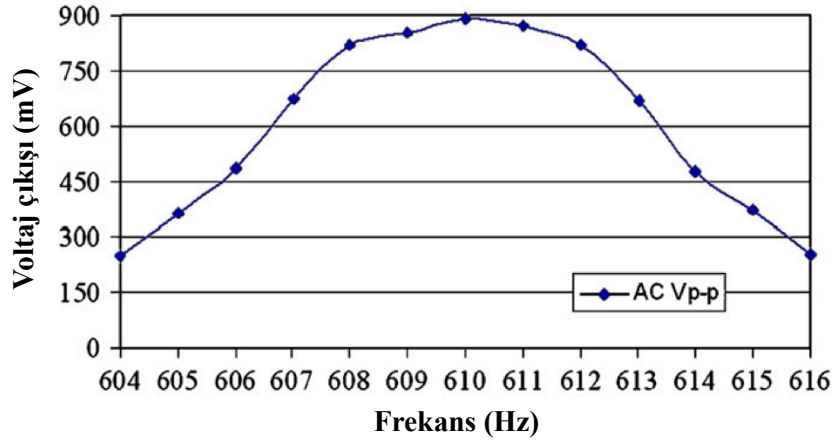
Çevredeki titreşimlerin frekansı ile enerji hasatı sisteminin doğal frekansının rezonans oluşturabilecek şekilde ayarlanabilmesi için Roundy ve arkadaşları [52] iki seçenek önermişlerdir. Buna göre ya sistemin çalıştırılacağı ortamın titreşim karakteristiklerinin önceden belirlenmesi ve sistemin ona göre inşa edilmesi ya da tek bir frekansta değil belirli bir frekans aralığında çalışmaya uygun tek bir cihazın tasarlanması gerekmektedir. Şekil 1.17’de görüldüğü gibi tasarlanan sistemin verimli çalışabileceği frekans aralığı yine de oldukça dardır. Bu aralık birçok sistemde 2-3 Hz olarak tespit edilmiştir (Şekil 1.13).

$$P = \frac{V^2}{2R} = \frac{1}{2R} \times \frac{\left(\frac{2k_{33}t_c}{k_2}\right)^2 \frac{c_p}{\epsilon} A_{in}^2}{\left[\frac{\omega_n^2}{\omega RC_b} - \omega \left(\frac{1}{RC_b} + 2\zeta \omega_n\right)\right]^2 + \left[\omega_n^2 (1 + k_{31}^2) + \frac{2\zeta \omega_n}{RC_b} - \omega^2\right]^2} \quad (1.17)$$

Bütün bu çabaya rağmen, sistemin verimli şekilde çalıştığı aralık oldukça dar kalmıştır (Şekil 1.14). Bu aralık Şekil 1.13’de görülen MEMS çubuk yapısı için 8 Hz olarak belirlenmiştir [51].



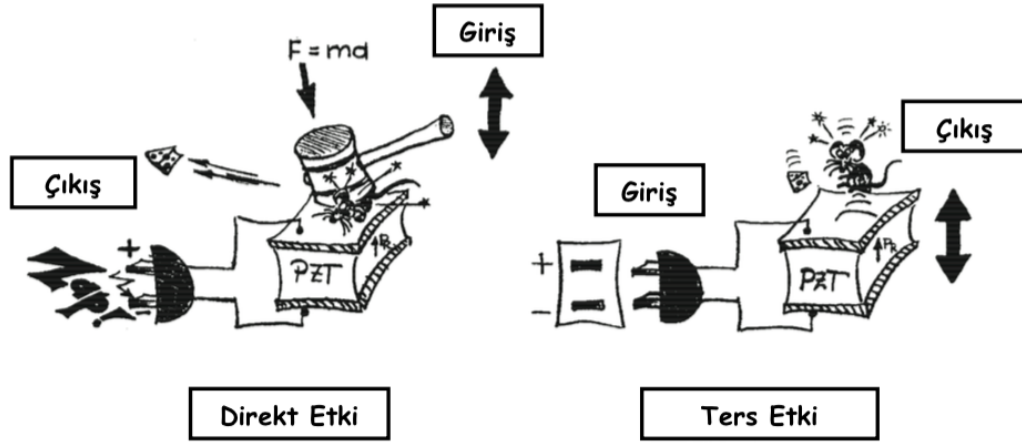
**Şekil 1.13:** Tekil bir ankastre kirişin şematik yapısı [51]



**Şekil 1.14:** Şekil 1.13'te gösterilen sistemin, tahrik frekansına karşılık çıkış voltajı [51]

## 1.2 Piezoelektrik Seramikler

Piezoelektrik özellik, malzemeye uygulanan basma kuvvetine karşılık malzemenin polarizasyonunun değişmesidir. Aynı şekilde malzeme elektrik alan etkisinde kaldığında bir gerinme oluşur. İlk etki direkt piezoelektrik etki, ikincisi ise ters piezoelektrik etki olarak adlandırılır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15: Direkt ve ters piezoelektrik etkiler [53]

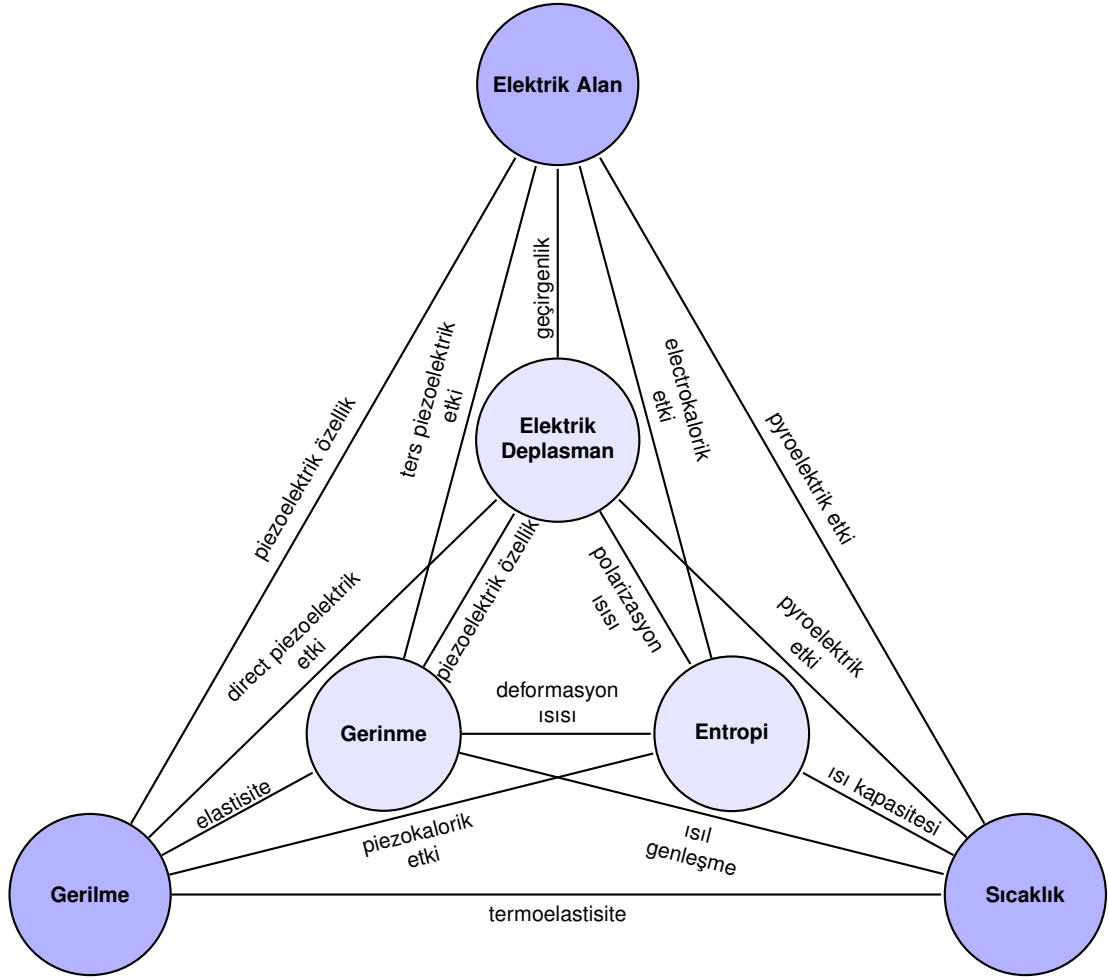
Piezoelektrik transdüserlerde görülen elektromekanik etkiler için temel denklemler; direkt piezoelektrik etki için;

$$D = dE + \epsilon^T E \quad (1.18)$$

ve ters piezoelektrik etki için;

$$S = s^E T + dE \quad (1.19)$$

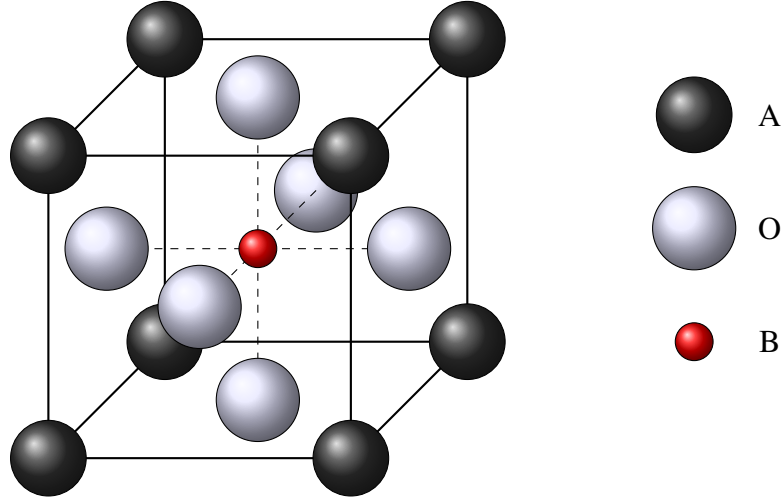
şeklinde verilir. Burada D polarizasyon (dielektrik deplasman), d piezoelektrik yük sabitesi, E elektrik alan,  $\epsilon^T$  malzemenin sabit gerilme altında dielektrik sabiti, T gerilme, S gerinme ve  $s^E$  sabit elektrik alan altında gerinmedir. Heckmann Şeması elektriksel, mekanik ve ısı özellikler arasındaki bağlantıları göstermektedir (Şekil 1.16).



**Şekil 1.16:** Heckmann Şeması

En yaygın olarak kullanılan piezoelektrik seramik kompozisyonu "kurşun zirkonat titanat (PZT)"tır. Bu seramik kompozisyonları *perovskit* ( $ABO_3$ ) yapısındadırlar. Bu yapı,  $PbTiO_3$  ve  $PbZrO_3$ 'ün bir katı çözeltilisidir. Bu yapıda  $Pb^{+2}$  A-yerinde,  $Zr^{4+}/Ti^{4+}$  iyonları da B-yerinde bulunmaktadır (Şekil 1.17).

Curie sıcaklığı adı verilen bir sıcaklıkta, katı çözeltili, paraelektrik kübik yapıdan ferroelektrik yapıya geçiş yapar. Bu ferroelektrik yapı kompozisyona bağlı olarak farklı kristal yapılarda olabilir. Morfotropik faz sınırı (MPB) adı verilen bir bölgede paraelektrik kübik yapıdan titanyumca zengin tetragonal yapıya ya da zirkonyumca zengin rombohedral yapıya faz dönüşümü gerçekleşebilmektedir. (Şekil 1.18). Titanyumca zengin olan tetragonal yapıda 6 olası polarizasyon yönü bulunmaktayken zirkonyumca zengin rombohedral yapıda 8 olası polarizasyon



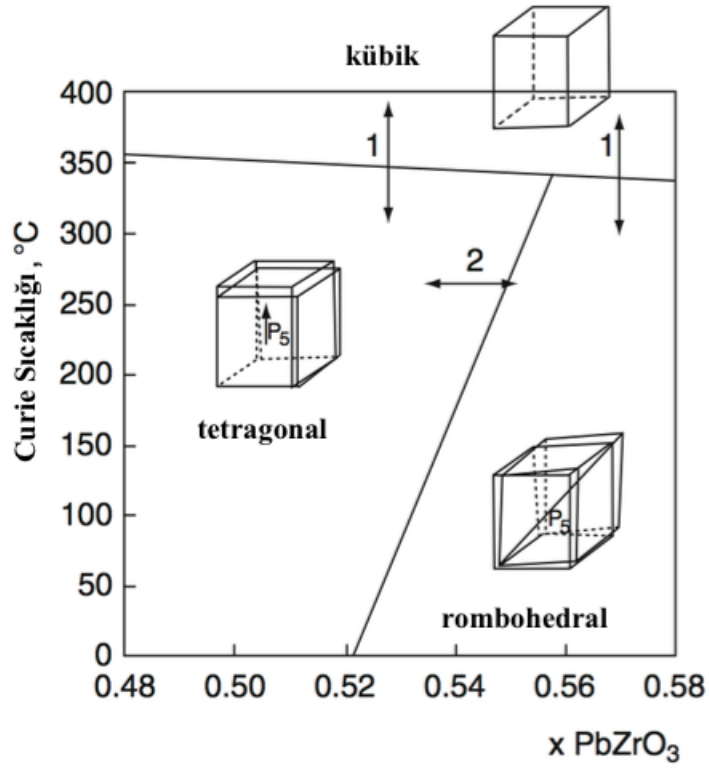
**Şekil 1.17:** Perovskit yapısı [54]

yönü bulunmaktadır. MPB’de bu iki yapının birlikte bulunması sonucu toplam 14 olası polarizasyon yönü söz konusudur ve bu da PZT’nin MPB’de neden mükemmel piezoelektrik özelliklere haiz olduğunu açıklamaktadır.

Piezoelektrik seramik kompozisyonların özellikleri istenildiği gibi değiştirilebilmektedir. Bu, yapıya bir takım katkıların eklenmesi ile gerçekleştirilmektedir (Çizelge 1.9). Eklenen katkı maddesinin seramiğe kazandırdığı özelliklere göre PZT seramikleri iki ana gruba ayrılabilir; "sert PZT" ve "yumuşak PZT". Sert PZT kompozisyonları genellikle yüksek güç uygulamalarında kullanılırken, yumuşak PZT kompozisyonları algılayıcı ve elektriksel yük üretici olarak kullanılmaktadır.

Perovskit yapısında bir piezoelektrik seramik kompozisyonuna eklenen bağışçı bir katkı (B-yeri için  $Nb^{5+}$ ,  $Sb^{5+}$ ,  $W^{6+}$  ve A-yeri için  $La^{3+}$ ,  $Bi^{3+}$ ,  $Nd^{3+}$ ) kation (Pb) boşlukları oluşturur ve daha yüksek piezoelektrik sabitler ve daha yüksek dielektrik sabitesi elde edilmesini sağlar. Aynı zamanda bu seramik kompozisyonları yüksek dielektrik kayıplara ve düşük Curie noktasına (genellikle  $300^{\circ}C$ ’nin altında) sahiptirler ve bu özellikleri, yumuşak PZT kompozisyonlarının yüksek frekans ve yüksek güç uygulamalarında kullanılmasını engeller.

Öte yandan, perovskit yapısında bir piezoelektrik seramik kompozisyonuna eklenen alıcı bir katkı (B-yeri için  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  ve A-yeri için  $K^{+}$ ,  $Ag^{+}$ ,  $Na^{+}$ ) anyon (oksijen) boşlukları oluşturur ve bu da düşük piezoelektrik sabitler ve düşük dielektrik sabitesi ile karşımıza çıkar. Ancak düşük dielektrik kayıplar ve



**Şekil 1.18:** PZT katı çözeltilisinde faz dönüşümleri [54]

yüksek Curie noktası bu sert PZT kompozisyonlarının yüksek güç uygulamalarında kullanılmasına izin verir. Yumuşak ve sert piezoelektrik kompozisyonların genel bir karşılaştırması Çizelge 1.9’da verilmiştir.

**Çizelge 1.8:** Perovskit yapıda kullanılan katkıları [54]

	Küçük iyonlar: B <sup>4+</sup> pozisyonları		Büyük iyonlar: A <sup>2+</sup> pozisyonları	
	İyon	İyon yarıçapı	İyon	İyon yarıçapı
PZT	Ti <sup>4+</sup>	0.68	Pb <sup>2+</sup>	1.20
	Zr <sup>4+</sup>	0.80	Sr <sup>2+</sup>	1.13
Bağışçı	Nb <sup>5+</sup>	0.70	La <sup>3+</sup>	1.22
	Sb <sup>5+</sup>	0.62	Bi <sup>3+</sup>	0.96
	W <sup>6+</sup>	0.68	Nd <sup>3+</sup>	1.04
Alıcı	Mn <sup>2+</sup>	0.80	K <sup>+</sup>	1.33
	Fe <sup>3+</sup>	0.64	Ag <sup>+</sup>	1.26
	Al <sup>3+</sup>	0.50		

**Çizelge 1.9:** Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin özellikleri

Özellik	Birim	Yumuşak Piezoelektrik*	Sert Piezoelektrik*
		Seramikler	Seramikler
Piezoelektrik	$d_{33}$	400 - 650	120 - 350
Yük Sabiti	$-d_{31}$	$10^{-12} \frac{C}{N}$	165 - 275
	$d_{15}$		530 - 770
Piezoelektrik	$g_{33}$	16 - 33.1	12 - 29
Voltaj Sabiti	$-g_{31}$	$10^{-3} \frac{Vm}{N}$	8.7 - 13
	$g_{15}$		26.8 - 38.2
Bağıl Dielektrik Sabiti	$\epsilon_r$	1350 - 4200	950 - 1650
Bağlanma Katsayısı	$k_p$	0.48 - 0.68	0.30 - 0.62
Mechanik Kalite Faktörü	$Q_m$	50 - 100	1000 - 2000

\*Değerler, çeşitli kaynaklardan [55–58] elde edilen verilerin en geniş aralıkları olarak düzenlenmiştir

## 2. AMAÇ VE ÖNEM

Elektronik teknolojisindeki ilerlemeler mobil cihazların ve kablosuz algılayıcı ağlarının güç tüketiminin azalmasını sağlamıştır. Bu tür uygulamalarda birincil güç kaynağı olarak kullanılan pillerin ömürleri kısıtlıdır. Dolayısıyla cihazların kullanım ömürleri boyunca mutlaka pillerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Pillerin değiştirilmesi süreci oldukça zaman alıcı olabilmektedir. Hatta algılayıcı ağlarının geniş bir bölgeye yayıldığı ya da mühendislik yapısının içerisine gömülü olduğu durumlarda pillerin değiştirilmesi oldukça zahmetli bir duruma gelmektedir. Pillerin enerji yoğunluklarındaki gelişmelerin elektronik cihazların, disk kapasitesi, işlemci hızı, hafıza ve kablosuz transfer hızı gibi, diğer özelliklerindeki gelişmelerin gerisinde kalmış olması da pillerin birincil enerji kaynağı olarak kullanılabilirliğini sorgulanır hale getirmiştir. Sonuç olarak, enerji hasatı üniteleri tarafından üretilebilen düşük miktardaki elektriksel güçler mobil cihazlara ya da kablosuz algılayıcı ağlarına güç sağlayabilir duruma gelmektedir.

Bu tezin başlıca amacı, zil tipi transdüserlere dayalı yeni bir enerji hasatı ünitesinin enerji hasatı karakteristiklerini belirlemek ve değerlendirmektir. Ayrıca, yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik seramik kompozisyonlarının ve seramikleri tabakalı yapılar oluşturacak şekilde kullanmanın enerji hasatı uygulamaları açısından yararlarını belirlemek de tezin amaçları arasında yer almaktadır.

Yüksek enerji yoğunluklu PZNN-PZT piezoelektrik seramik kompozisyonları oldukça iyi enerji hasatı özellikleri sergilemektedir ancak bu seramiklerin elektriksel empedansları yüksektir. Dolayısıyla en yüksek miktarda enerjiyi elektronik sistemlere aktarabilmek için elektronik sistemin empedansının da yüksek olması gerekecektir. Diğer taraftan seramikleri tabakalı olarak kullanmak daha düşük elektriksel empedans elde etmeye ve dolayısıyla da daha geniş aralıkta bir elektronik devre seçimine olanak tanımaktadır.

Yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik seramik kompozisyonlarının üretilmesi ve karakterizasyonu Bölüm 3'te aktarılmıştır. Kompozisyonların faz yapısı, mikro yapısı, dielektrik ve piezoelektrik özellikleri incelenmiştir.

Bölüm 4'te ankastre çubuk yapısındaki piezoelektrik enerji hasatı ünitesinin matematik modeli türetilmiştir. Enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansını etkileyen değişkenler belirlenmiştir.

Belirlenen bu değişkenlerin ankastre çubuk tipi piezoelektrik enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansına olan etkileri bir Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) çalışması yardımıyla bölüm 5'te irdelenmiştir. Enerji hasatı uygulamalarında faydalanılabilir aralık, gündelik hayatta karşımıza çıkan titreşim kaynaklarının çoğunda tespit edilmiş olan 200 Hz'ten daha düşük frekanslardır. Dolayısıyla ankastre çubuk tipi piezoelektrik enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansı 200 Hz'in altında kalacak şekilde bir tasarım yapılmıştır.

Bölüm 6'da yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik seramik kompozisyonları ile yumuşak piezoelektrik seramikler, enerji hasatı performansları açısından karşılaştırılmışlardır. Malzemelerin performanslarını ve disklerin tabakalı olarak kullanılmasının avantajlarını değerlendirebilmek amacıyla, deneysel çalışmada tek tabakalı PZNN-PZT ve PZT 5H diskler ve iki tabakalı PZT 5H diskler kullanılmıştır.

Daha sonrasında Bölüm 7'de ankastre çubuk tipi piezoelektrik enerji hasatı ünitesi deneysel olarak incelenmiştir. Enerji hasatı ünitesi tarafından üretilen güç ve enerji frekansın ve kullanılan uç kütlelerin bir fonksiyonu olarak ölçülmüş ve sonuçlar irdelenmiştir.

### 3. YÜKSEK ENERJİ YOĞUNLUKLU PİEZOELEKTRİK SERAMİK KOMPOZİSYONLARI

#### 3.1 Teori

Piezoelektrik seramik enerji üretici ünitelerin açık devre enerji yoğunlukları

$$w_e = \frac{1}{2} [\epsilon_{33}^T g_{33}^2 T_3^2] \quad (3.1)$$

denkleminde verilmektedir. Burada  $\epsilon_{33}^T$  malzemenin, sabit basınç altında, dielektrik geçirgenliği,  $T_3$  polarizasyon doğrultusundaki gerilme ve  $g_{33}$  piezoelektrik voltaj sabitesidir. Piezoelektrik voltaj sabitesi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_0 \epsilon_r^T} \quad (3.2)$$

Burada  $\epsilon_r^T$  sabit gerilme altında dielektrik sabitesidir ve

$$\epsilon_r^T = \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik geçirgenliğidir ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m). Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 birleştirildiğinde piezoelektrik voltaj sabitesi ( $g_{33}$ ) şu formülle ifade edilebilmektedir;

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'ü Eşitlik 3.1'de yerine koyduğumuzda enerji yoğunluğunu

$$w_e = \frac{1}{2} d_{33} g_{33} T_3^2 \quad (3.5)$$

ya da

$$w_e = \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2 T_3^2}{\epsilon_{33}^T} \quad (3.6)$$

şeklinde elde ederiz. Eşitlik 3.5'ten anlaşılacağı üzere aynı koşullarda işlev gören ve aynı boyutlardaki piezoelektrik enerji üreteçleri için enerji yoğunluğu, Islam ve Priya'nın [59] çalışmalarında da ifade edildiği üzere, piezoelektrik yük sabitesi ( $d_{ij}$ ) ile piezoelektrik voltaj sabitesinin ( $g_{ij}$ ) çarpımıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Yüksek  $g_{ij}$ , ancak dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ya da piezoelektrik yük sabitesi ( $d_{ij}$ ) gibi malzeme özelliklerinin kontrol edilmesiyle sağlanabilmektedir. Daha yüksek  $d_{ij}$  ve/veya daha düşük  $\epsilon$  değeri, yüksek  $g_{ij}$  için sağlanması gereken kriterlerdir (Eşitlik 3.4).

Dolayısıyla, Eşitlik 3.6'dan da anlaşılacağı üzere, piezoelektrik üreteçlerin enerji yoğunluğu, kullanılan malzemenin piezoelektrik yük sabitesinin karesiyle doğru orantılı, dielektrik geçirgenlik ile ters orantılı olacak şekilde değişmektedir. Piezoelektrik yük sabitesi ( $d_{ij}$ ) ile piezoelektrik voltaj sabitesinin ( $g_{ij}$ ) çarpımı *dönüştürme oranı* [59, 60] olarak tanımlanmıştır ve enerji hasatı uygulamaları için belirleyici ölçüt olarak belirlenmiştir.

### 3.2 PZN-PZT Sistemi

Kurşun zirkonat niyobat (PZN) sistemi  $Pb(A_xB_{1-x})O_3$  yapısındaki çok sayıda relaksör perovskitten biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu relaksör perovskitlerde A-yeri iyonları  $Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Sc^{3+}$  ve B-yeri iyonları da  $Nb^{5+}, Ta^{5+}, W^{6+}$  [61] olarak karşımıza çıkmaktadır. Genelde  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  yapısında relaksör ferroelektrik malzeme olarak kullanılan PZN oda sıcaklığında rombohedral yapıda bulunmaktadır. PZN tek kristaller ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak PZN'in düşük tolerans faktörüne sahip olması ve yapıdaki katyonlar arasında küçük eksi-ilişlilik farkı olmasından dolayı payroklor fazı perovskit fazından daha kararludur [62]. Perovskit yapılar ( $ABO_3$ ) için tolerans faktörü

$$t = \frac{R_A + R_O}{\sqrt{2}R_B + R_O} \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanır. Perovskit yapı  $0.80 < t < 1.06$  değerleri için kararludur. Tolerans faktörü  $t > 1$  için genelde tetragonal simetriye sahip perovskit yapı gözlemlenirken  $t < 1$  için rombohedral perovskit yapının oluştuğu görülmektedir.

Morfotropik faz sınırının ise genellikle  $t \simeq 1$  civarında ( $0.97 < t < 1.02$ ) bulunduğu söylenebilir. PZN yapısının tolerans faktörü ve katyonları arasındaki elektronegatiflik farkı küçük olduğundan dolayı payroklor fazı termodinamik olarak perovskit fazından daha karardır [63].

Payroklor fazının perovskit fazından daha karard olması sebebiyle çok kristalli PZN yapıların sentezlenmesi kimyasal ilaveler yapılmadığında mümkün değildir. Perovskit PZN yapının karard hale getirilmesinin yollarından bir tanesi de perovskit yapısına sahip karmaşık oksitlerin yapıya eklenmesidir [64]. Bu aşamada uygulanan yöntemlerden bir tanesi tetragonal PZT yapının rombohedral PZN yapıya ilavesiyle karardlığı sağlamaktır.

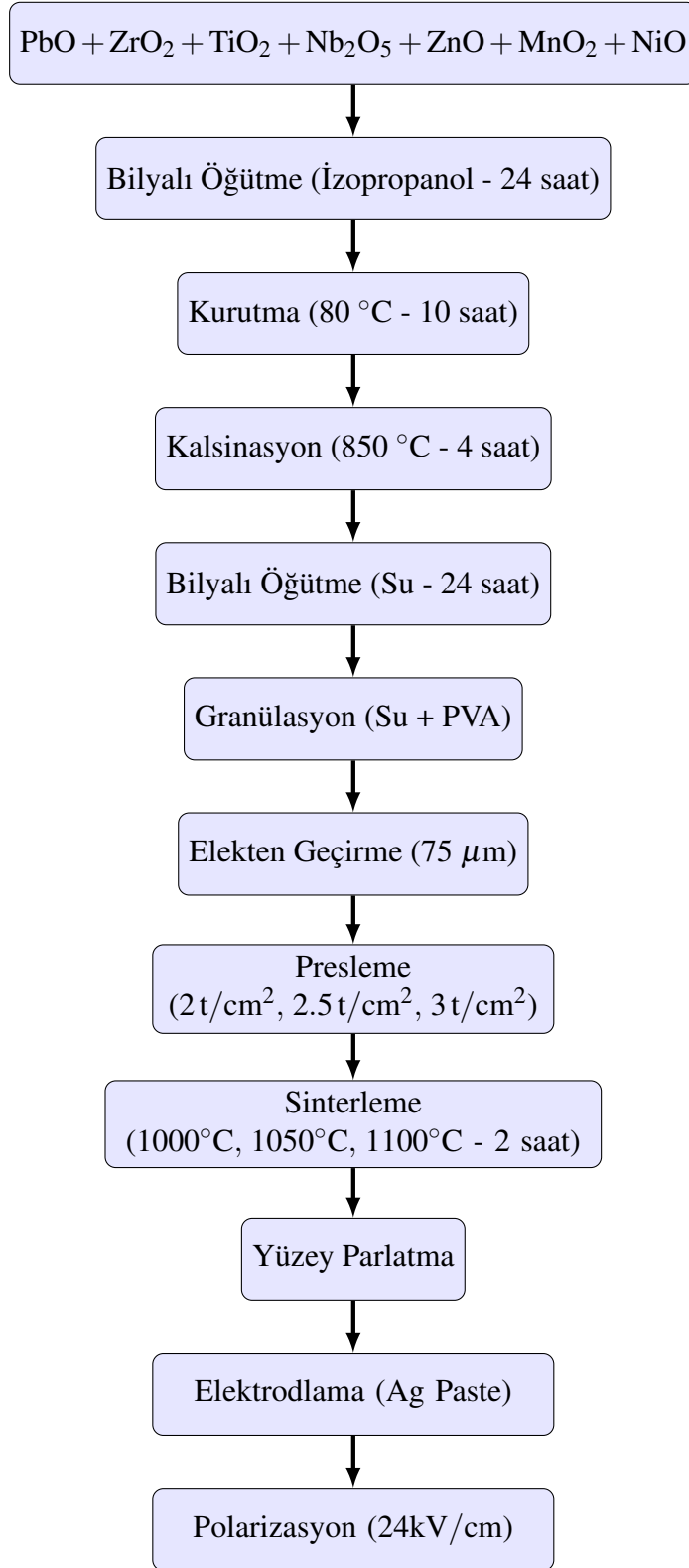
Çok kristalli PZN-PZT seramiklerini üretmek için kullanılan yöntemler **1)** karışık oksit yöntemi [64,65] ve **2)** kolumbit prekürsör yöntemidir [66,67]. Her iki yöntem için de akış şemaları sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.

Karışık oksit yönteminde, başlangıç malzemeleri olarak PbO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZnO, MnO<sub>2</sub> ve NiO oksitlerinin deneysel saflıkta tozları kullanılmıştır. Tozlar tartıldıktan sonra, kısmi karardlaştırılmış zirkonyum oksit bilyalar ve izopropil alkol içerisinde, 24 saat süreyle bilyalı değirmende döndürülerek karışmaları sağlanmıştır. Daha sonra toz karışımı 80°C’de 10 saat süreyle kurutulmuştur.

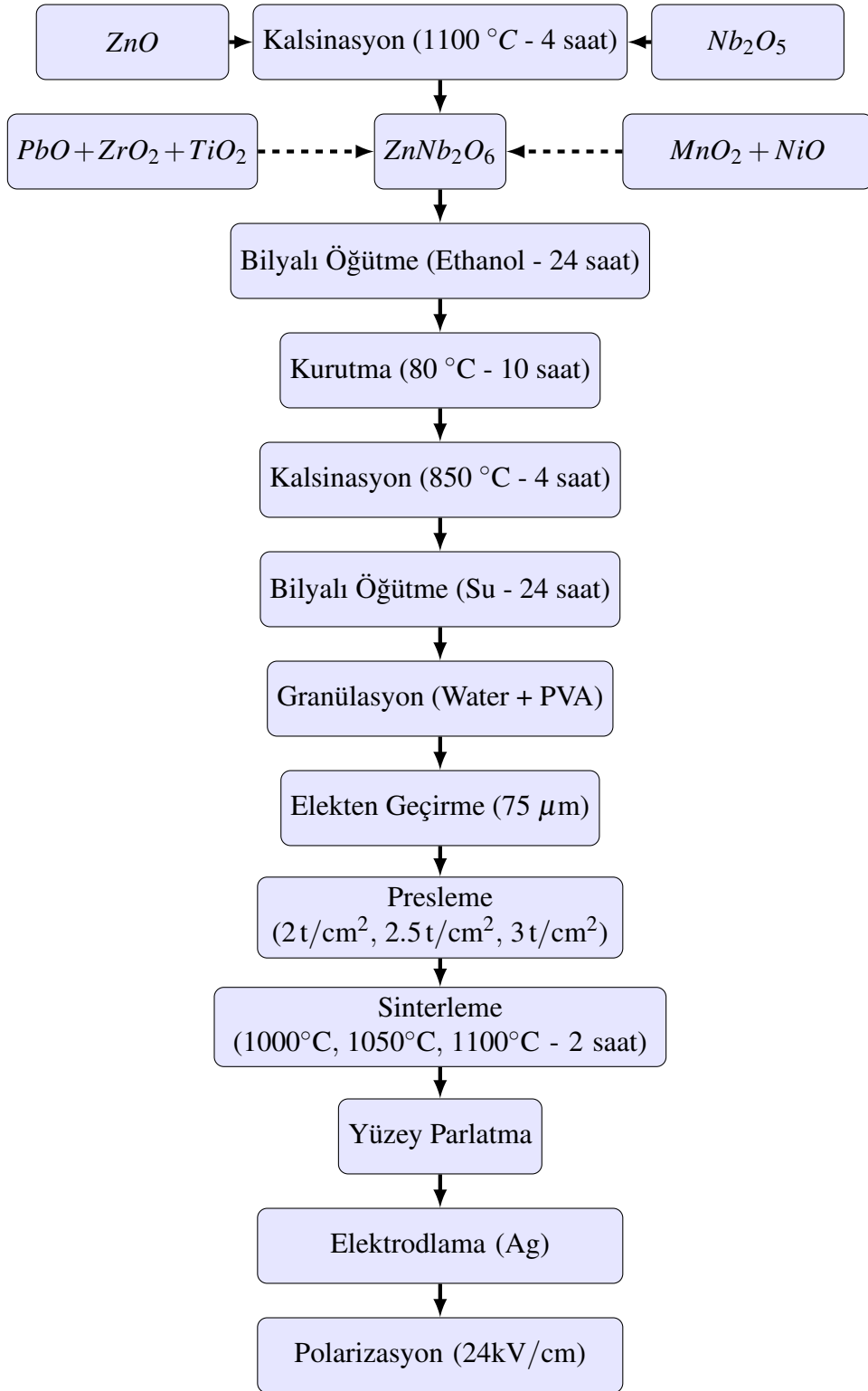
Kolumbit prekürsör yönteminde ise başlangıç malzemeleri olan ZnO ve Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> öncelikle 1100°C’de 4 saat süreyle kalsinasyon işlemine tabi tutularak ZnNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> kolumbit fazının oluşması sağlanmıştır. Daha sonra diğer oksitler olan PbO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> ve NiO sisteme katılarak kısmi karardlaştırılmış zirkonyum oksit bilyalar ve etanol içerisinde, 24 saat süreyle bilyalı değirmende döndürülerek karışmaları sağlanmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında toz karışımı 80°C’de 10 saat süreyle kurutulmuştur. Bu aşamadan sonra karışık oksit yöntemi ile kolumbit prekürsör yöntemleri tamamen aynı süreçlerle devam ettirilmiştir.

Kurutmadan sonra karışım alumina bir pota içerisinde 850°C’de 4 saat süreyle kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kalsine olmuş tozlar yeniden zirkonyum oksit bilyalar ile bu defa sulu ortamda ve dağıtıcı olarak suda çözülmüş DARVAN C içerisinde 24 saat öğütülmüştür. Elde edilen granüller tek eksenli bir hidrolik

pres yardımıyla 15 mm çapında disk şeklinde tabletler olarak şekillendirilmişlerdir. Şekillendirmede kullanılan presleme basınçları  $2 \text{ t/cm}^2$ ,  $2.5 \text{ t/cm}^2$  ve  $3 \text{ t/cm}^2$ 'dir. Disk numunelerin sinterleme davranışını incelemek amacıyla  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1050^\circ\text{C}$  ve  $1100^\circ\text{C}$ 'deki sıcaklıklarda, alumina pota içerisinde 2 saat süreyle sinterleme yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerinden gerçekleşecek olan PbO kaybını sınırlandırmak maksadıyla pota içerisinde PbO açısından zengin bir atmosfer yaratmak gerekmektedir. Bu amaçla eşit mol sayısında PbO ve  $\text{ZrO}_2$  karışımından oluşan tabletler pota içerisine yerleştirilmiştir. Sinterlemeyi takiben numunelerin paralel yüzeyleri lepleme ile parlatılmıştır. Daha sonra parlatılan bu yüzeyler DuPont 7095 Ag iletken pasta ile kaplanmış ve  $580^\circ\text{C}$ 'de 10 dakika süreyle bekletilerek kalıcı iletken bir yüzey oluşumu sağlanmıştır. İletken yüzeyler öncelikle numunelerin polarizasyonu, sonrasında dielektrik ve piezoelektrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Seramik numuneler  $120^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki yağ banyosu içerisinde  $24 \text{ kV/cm}$  elektrik alan altında 15 dakika süreyle polarizasyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Dielektrik ve piezoelektrik özelliklerin ölçülmesinden önce numuneler 24 saat süreyle bekletilmiştir. Bu 24 saat sonrasında dielektrik özellikler empedans/kazanç analizörü (HP4194A, Hewlett-Packard, Palo Alto, CA) yardımıyla ölçülmüştür. Piezoelektrik yük sabitesi ( $d_{33}$ ) ölçümü ise yarı-statik piezoelektrik  $d_{33}$  metre (Pennebaker Model 8000, American Piezo Ceramics, Inc.) ile gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş numunelerin faz yapıları, X-ışınları kırınımı (XRD, Rigaku-Rint 2200) ile, Cu  $K\alpha$  radyasyonu ve grafit bir monokromatör kullanılarak incelenmiştir.  $2\theta$  açısı  $20^\circ$  ile  $80^\circ$  arasında  $0.02^\circ$  basamaklarla ve  $2^\circ/\text{min}$  hızla taranmıştır. Numunelerin mikroyapısı ise taramalı elektron mikroskobu (SEM, Zeiss Supra V50) kullanılarak kırılmış yüzeylerden 5 - 20 kV çalışma voltajı ile görüntüler alınarak incelenmiştir.



Şekil 3.1: Karışık oksit yöntemiyle PZN-PZT üretimi



**Şekil 3.2:** Kolumbit prekürsör yöntemiyle PZN-PZT üretimi

### 3.3 Sonuçlar

Yüksek enerji yoğunluklu seramiklerin üretilebileceği uygun koşulları tespit edebilmek amacıyla genel formülü  $Pb[(Zr_xTi_{1-x})O_3]_{0.9}\{[(Zn_{0.8}Ni_{0.2})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3\}_{0.1} + 0.5 \text{ wt } \% MnO_2$  olan ve  $x$  değeri 0.51 ile 0.54 arasında değişen dört farklı kompozisyon hazırlanmıştır. Morfotropik faz sınırında (MPB) piezoelektrik ve dielektrik özellikler en yüksek değerlerine ulaşmaktadırlar. Dolayısıyla  $x$  değerinin 0.51-0.54 aralığındaki bir noktada enerji hasatı uygulamaları açısından uygun özellikleri sergilemesi beklentisi oluşmuştur.

#### 3.3.1 Perovskit Fazı Kararlılığı ve Mikro Yapının İncelemesi

Uygun sinterleme sıcaklığını belirlemek amacıyla Zr/Ti oranı 52/48 olan PZNN-PZT seramik kompozisyonları 1000°C, 1050°C ve 1100°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Bu kompozisyonların XRD grafikleri Şekil 3.3- 3.8'de görülebilmektedir.

Şekil 3.3'teki XRD grafiği incelendiğinde 1000°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde az miktarda da olsa kübik payroklor fazı gözlemlenmektedir. Sinterleme sıcaklığı 1050°C'ye yükseldiğinde ise XRD grafiğinde  $2\theta \simeq 29^\circ$ 'de görülen payroklor fazının büyük miktarda azalmış olduğu görülebilmektedir (Şekil 3.4). Şekil 3.5'teki XRD grafiğinde ise payroklor fazının oluşumunun 1100°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde tamamen önlendiği açıkça görülmektedir.

Kolumbit prekürsör yöntemi ile hazırlanmış numunelerin XRD grafikleri Şekil 3.6-3.8'de verilmiştir. 1000°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde az miktarda payroklor fazının bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.6). 1050°C ve 1100°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde ise payroklor fazının oluşumunun tamamen engellendiği görülebilmektedir.

Karışık oksit yöntemi ile üretim daha kısa sürmekte ve daha az enerji tüketmektedir. Buna dayanarak PZNN-PZT kompozisyonlarının üretimi amacıyla karışık oksit yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

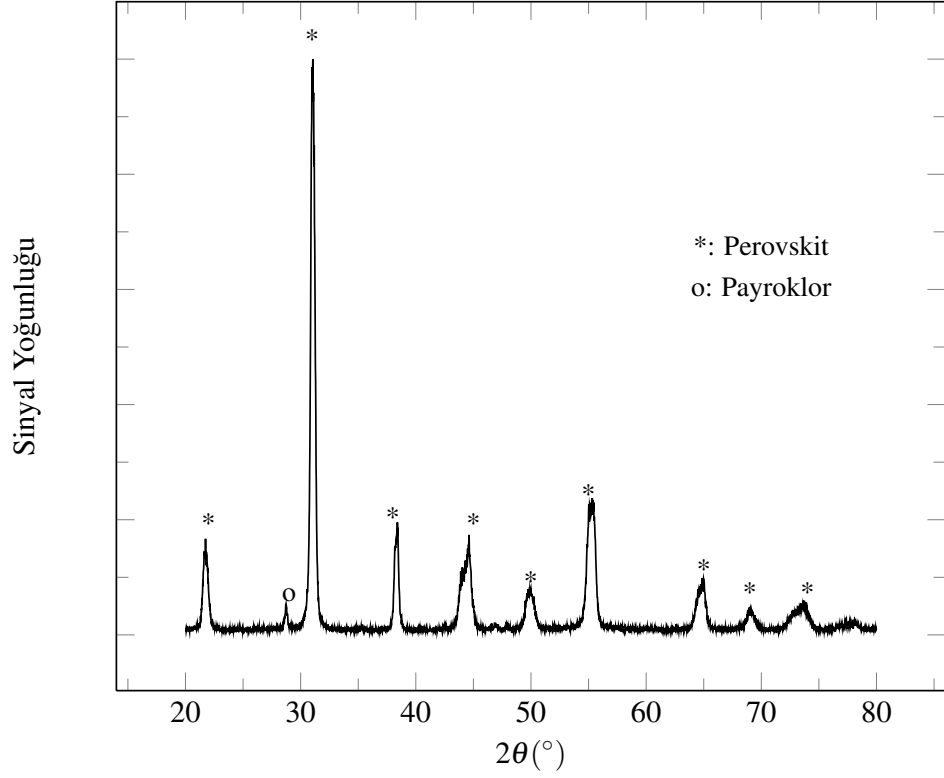
Fan ve Kim [68] kurşun (Pb) stokiyometrisinin PZN-PZT seramik kompozisyonlarının elektromekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini bildirmişlerdir. Yaptıkları çalışmaya göre kurşun konsantrasyonu stokiyometrik miktardan az olduğunda perovskit fazıyla beraber payroklor fazı da oluşmaktadır. Diğer taraftan, kurşun konsantrasyonu stokiyometrik miktarın çok üstünde olduğunda numunenin yüzeyinde PbO oluşumu gözlemlenmiştir. Bu ikincil fazlar elektromekanik özellikleri etkilemektedir.

Bu çalışmada sinterleme sıcaklığı belirlenirken, payroklor fazının yapıda perovskit fazına dönüşerek yok olduğu en düşük sıcaklık göz önüne alınmıştır. Sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi arttıkça numuneden PbO kaybı artmakta bu da PbO konsantrasyonunun stokiyometrik miktarın altında kalmasına sebep olmaktadır. Bu veriler ışığında sinterleme sıcaklığı 1050°C olarak belirlenmiştir. Zira bu sıcaklık payroklor fazının görülmediği en düşük sinterleme sıcaklığı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Uygun şekillendirme basıncını tespit edebilmek amacıyla Zr/Ti oranı 52/48 olan PZNN-PZT kompozisyonu tek eksenli pres ile 2 t/cm<sup>2</sup>, 2.5 t/cm<sup>2</sup> ve 3 t/cm<sup>2</sup> basınçlarda disk biçimindeki numuneler üretilmiştir. 1000°C, 1050°C ve 1100°C’de sinterlenen numunelerin mikro yapısı sırasıyla Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.

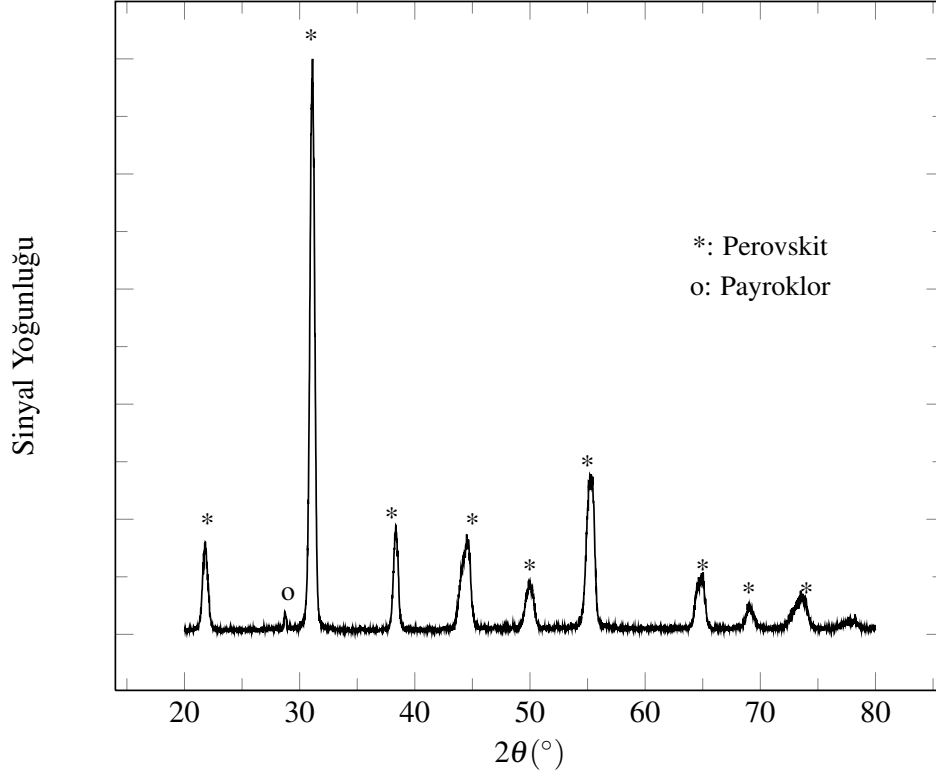
Şekillendirme basıncı 2 t/cm<sup>2</sup>’den 2.5 t/cm<sup>2</sup>’ye ve 3 t/cm<sup>2</sup>’e doğru arttıkça numunelerin tane boyutu da sırasıyla 1 µm’den 2.5 µm’ye ve 4.5 µm’ye doğru artış sergilemektedir. 2 t/cm<sup>2</sup> basınçla şekillendirilen numunelerde yüksek miktarda gözenekli bir yapı gözlemlenmektedir. Şekillendirme basıncı arttıkça gözeneklilik azalmaktadır. Sinterleme sıcaklığı da 1050°C ve 1100°C’ye yükseldikçe numunelerin daha üniform ve yoğun bir mikroyapı gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11).

Islam ve Priya [59] dielektrik sabitesinin en düşük, piezoelektrik yük sabitesinin de en yüksek olduğu durumun 3.5 µm’den daha küçük taneli seramiklerde görüldüğünü belirtmişlerdir. Yüksek enerji yoğunluklu bir piezoelektrik üretici için Eşitlik 3.6’da da tespit edildiği üzere yüksek piezoelektrik yük sabitesi ve

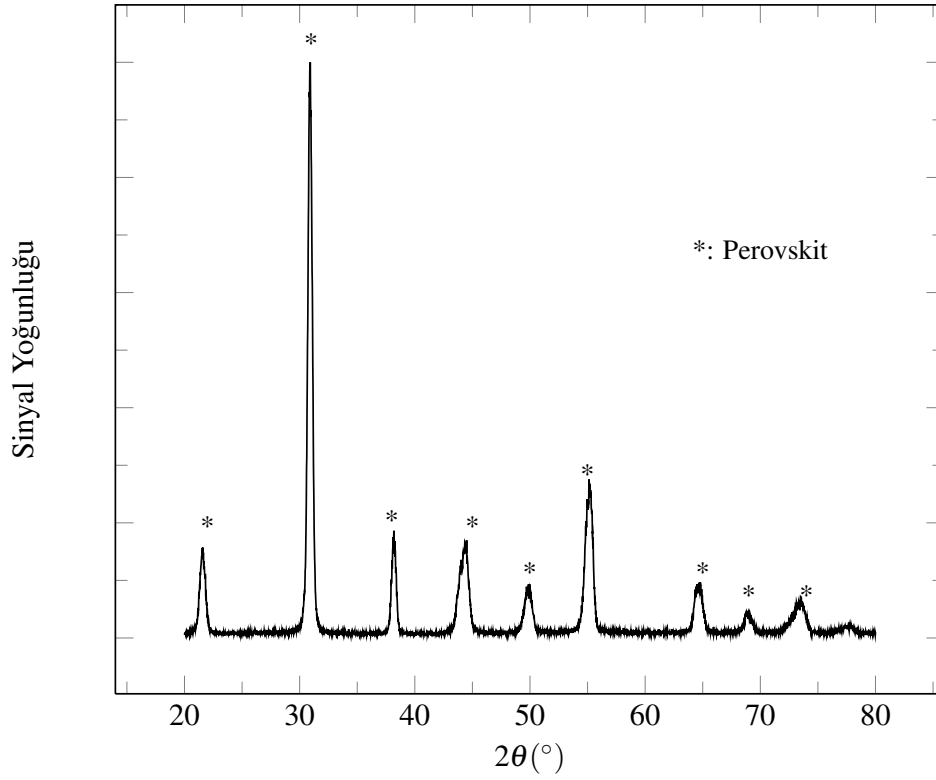


**Şekil 3.3:** Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş ve 1000 °C'de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi

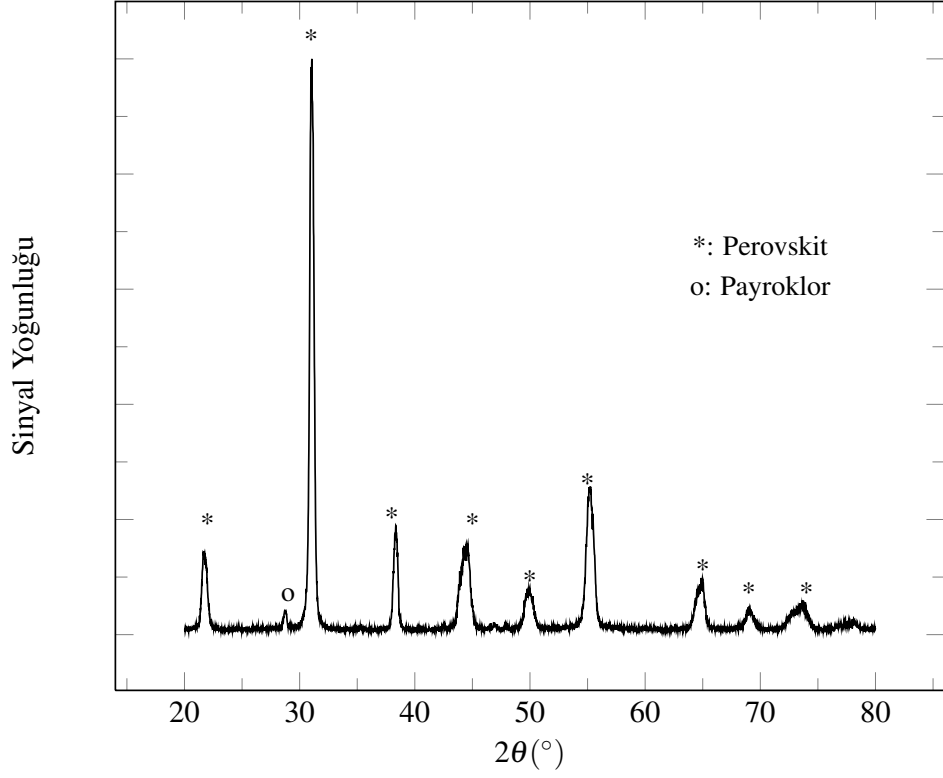
düşük dielektrik sabitesi gereklidir. Bu verilerin ışığında PZNN-PZT seramiklerinin üretimi için 2.5 t/cm<sup>2</sup>'lik şekillendirme basıncının uygun olduğu belirlenmiştir.



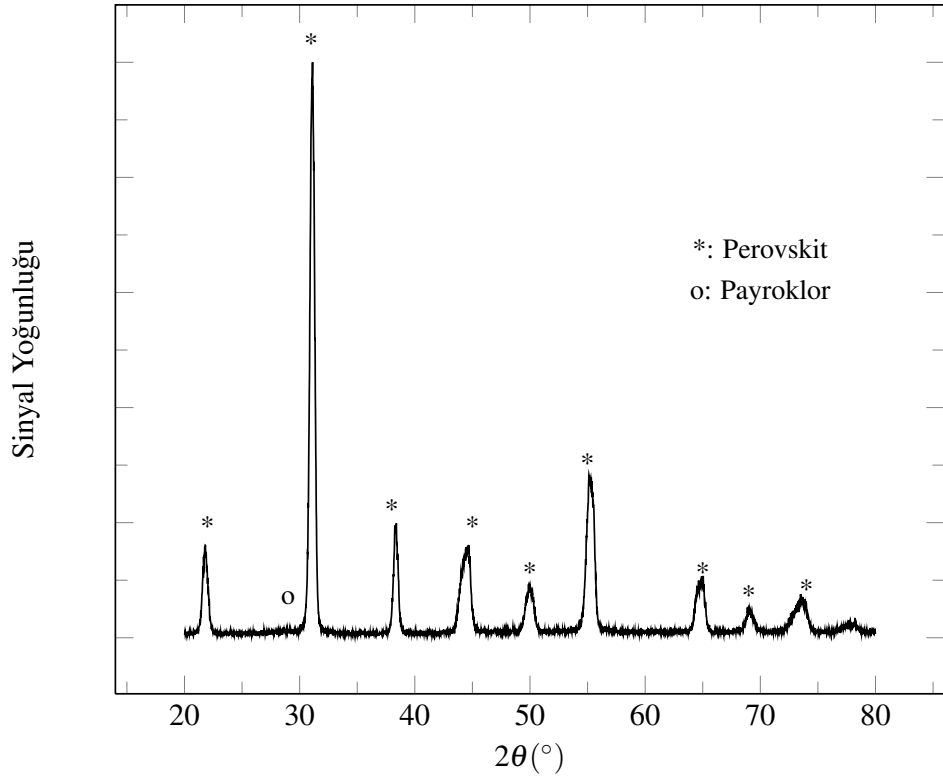
**Şekil 3.4:** Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş ve 1050 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi



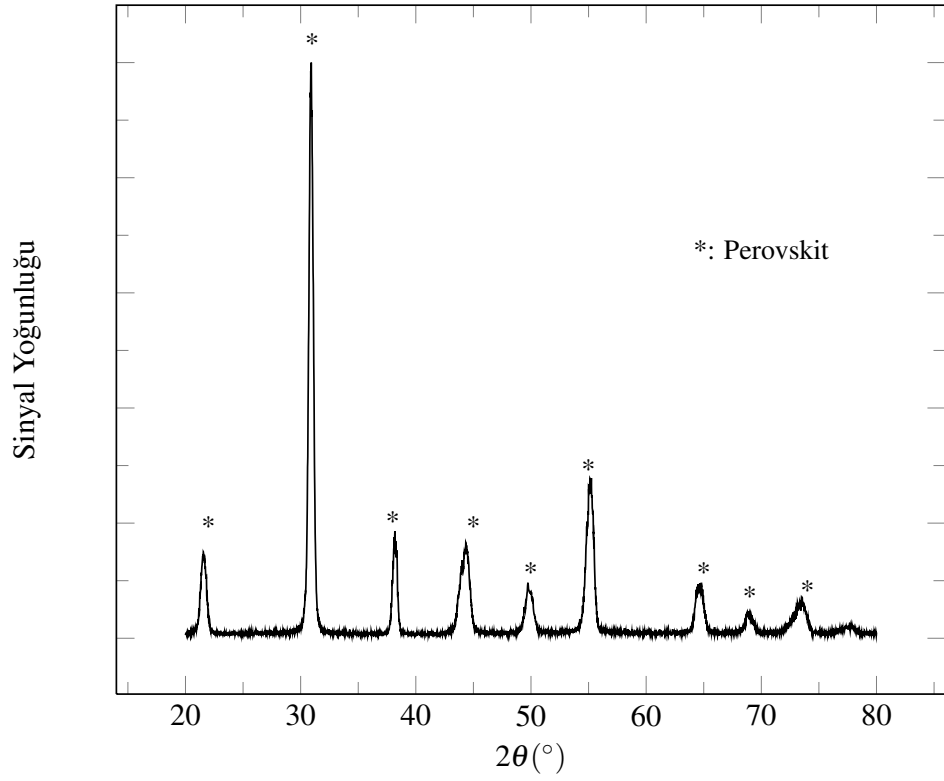
**Şekil 3.5:** Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş ve 1100 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi



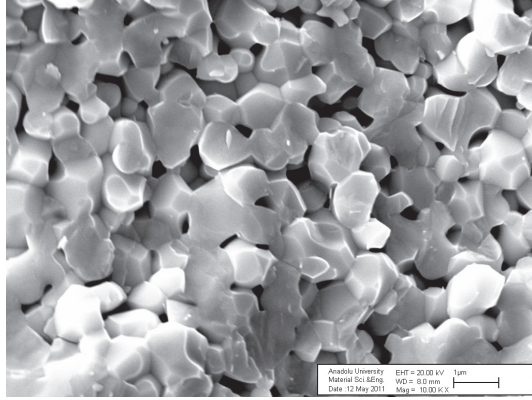
**Şekil 3.6:** Kolumbit prekürsör yöntemiyle üretilmiş ve 1000 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi



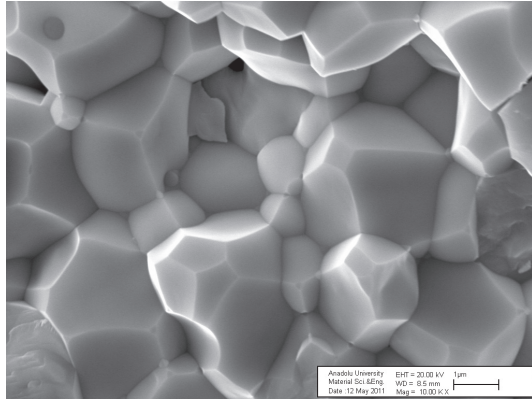
**Şekil 3.7:** Kolumbit prekürsör yöntemiyle üretilmiş ve 1050 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi



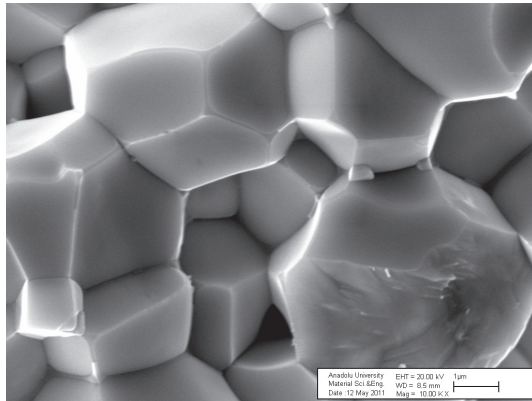
**Şekil 3.8:** Kolumbit prekürsör yöntemiyle üretilmiş ve 1100 °C’de 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin X-ışınları difraktometresi



(a)

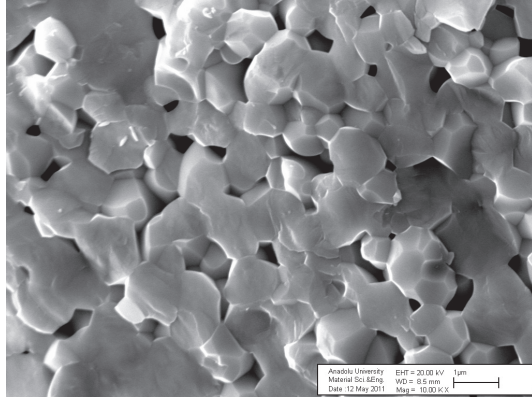


(b)

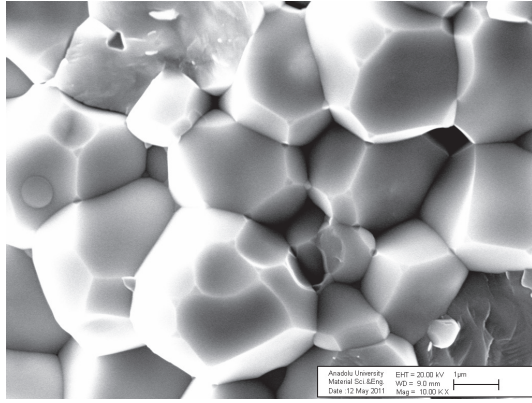


(c)

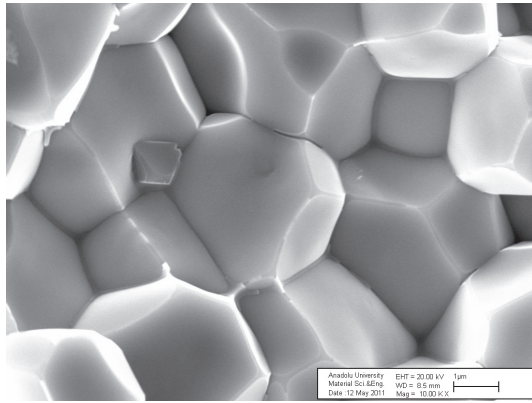
**Şekil 3.9:** a)  $2 \text{ t/cm}^2$ , b)  $2.5 \text{ t/cm}^2$  ve c)  $3 \text{ t/cm}^2$  basınçla şekillendirilmiş ve  $1000^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri



(a)

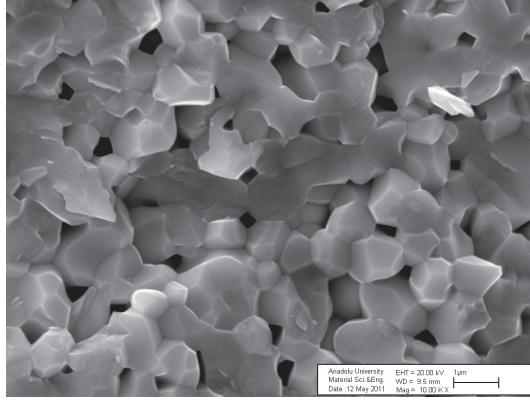


(b)

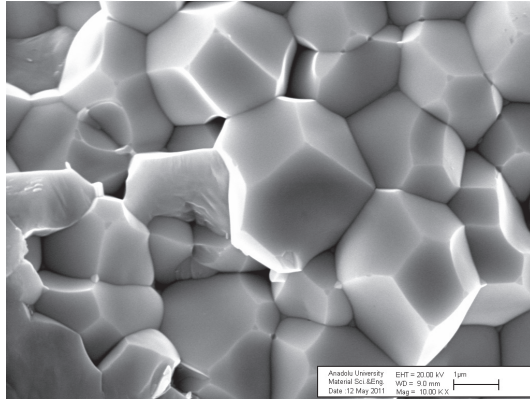


(c)

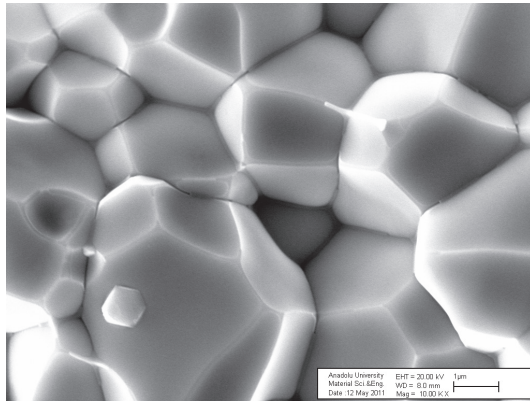
**Şekil 3.10:** a)  $2\text{ t/cm}^2$ , b)  $2.5\text{ t/cm}^2$  ve c)  $3\text{ t/cm}^2$  basınçla şekillendirilmiş ve  $1050^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri



(a)



(b)



(c)

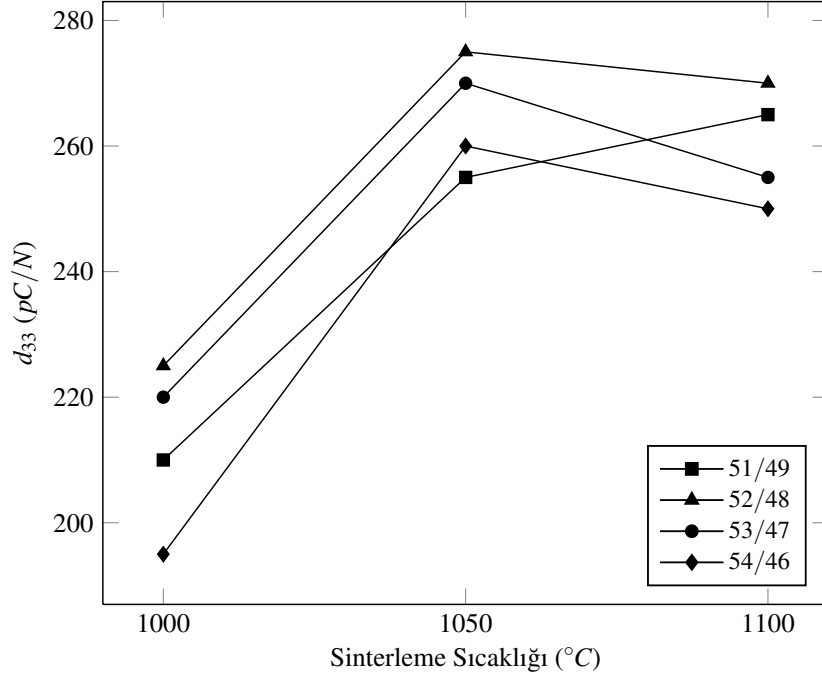
**Şekil 3.11:** a)  $2 \text{ t/cm}^2$ , b)  $2.5 \text{ t/cm}^2$  ve c)  $3 \text{ t/cm}^2$  basınçla şekillendirilmiş ve  $1100^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş PZNN-PZT seramiklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri

### 3.3.2 Dielektrik ve Piezoelektrik Özellikler

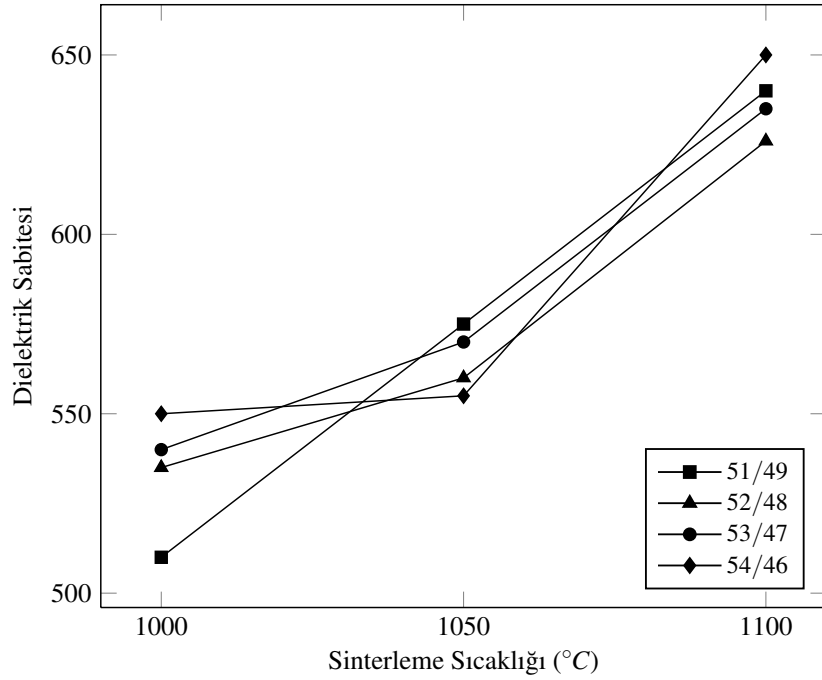
Karışık oksit yöntemiyle üretilmiş PZNN-PZT kompozisyonlarının dielektrik ve piezoelektrik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Ferroelektrik seramiklerde en iyi piezoelektrik ve dielektrik performans morfolotropik faz sınırında (MPB) görülmektedir. PZT seramikleri için MPB yaklaşık olarak Zr/Ti oranının 52/48 olduğu bölgede görülmektedir. Ancak kullanılan kimyasal katkıları bu faz sınırının kaymasına neden olmaktadır. PZN-PZ-PT katı çözeltilisinde en iyi dielektrik ve piezoelektrik özelliklerin görülmesi beklenen morfolotropik faz sınırını tespit edebilmek amacıyla PZNN-PZT seramik kompozisyonları Zr/Ti oranları 51/49, 52/48, 53/47 ve 54/46 olacak şekilde üretilerek dielektrik ve piezoelektrik özellikleri ölçümlerle tespit edilmiştir. Piezoelektrik yük sabitesi, dielektrik sabitesi ve piezoelektrik voltaj sabitesinde farklı sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak gerçekleşen değişimler sırasıyla Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te verilmiştir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi düşük sinterleme sıcaklıkları için; yani tane boyutunun ( $d$ ) 1 – 2.5  $\mu\text{m}$  aralığında olduğu numunelerde;  $d_{33}$  artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte hızlı bir artış göstermektedir. En yüksek  $d_{33}$  değeri 1050 °C’de sinterlenen numunelerde görülmektedir ki bu da ideal tane boyutunun 2.5 – 4.5  $\mu\text{m}$  aralığında olması anlamına gelmektedir. Sinterleme sıcaklığı 1050 °C’nin üzerine çıktığında bütün kompozisyonların  $d_{33}$  değerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça dielektrik sabitesi, Şekil 3.13’te görüldüğü gibi, artış göstermektedir. Düşük sinterleme sıcaklıkları için  $g_{33}$  artan sinterleme sıcaklığıyla beraber artış göstermekte ve en yüksek değerine 1050 °C’de sinterlenen numunelerde ulaşmaktadır. Sonuç olarak en yüksek  $d_{33} \cdot g_{33}$  çarpımı olan  $15.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$  değeri, 1050 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş olan ve Zr/Ti oranı 52/48 olan numunelerde görülmektedir.

**Çizelge 3.1:** Karışık oksit yöntemiyle hazırlanmış PZNN-PZT kompozisyonlarının dielektrik ve piezoelektrik özellikleri

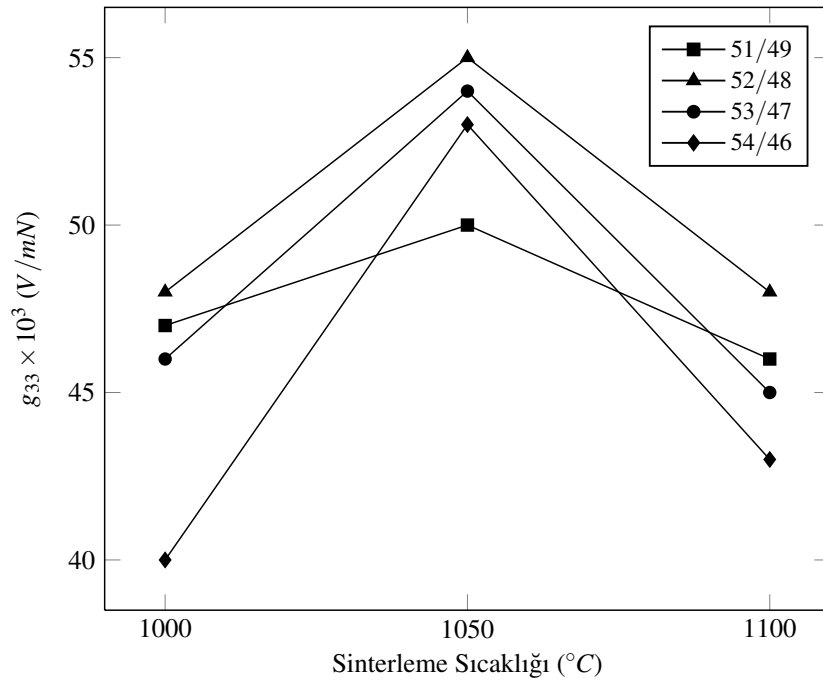
Zr/Ti Oranı	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	$d_{33}$ ( $10^{-12}C/N$ )	$k_p$	$K^T$	$g_{33}$ ( $V/mN$ )	$d_{33} \cdot g_{33}$ ( $10^{-12}m^2/N$ )
51/49	1000	210	0.45	510	0.047	9.77
52/48		225	0.46	535	0.048	10.7
53/47		220	0.46	540	0.046	10.1
54/46		195	0.42	550	0.040	7.8
51/49	1050	255	0.59	575	0.050	12.8
52/48		275	0.59	560	0.055	15.3
53/47		270	0.58	570	0.054	14.5
54/46		260	0.59	555	0.053	13.8
51/49	1100	265	0.58	640	0.046	12.4
52/48		270	0.55	626	0.048	13.2
53/47		255	0.51	635	0.045	11.5
54/46		250	0.43	650	0.043	10.8



Şekil 3.12: PZNN-PZT kompozisyonlarının piezoelektrik yük sabitelerinin ( $d_{33}$ ) sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi



Şekil 3.13: PZNN-PZT kompozisyonlarının dielektrik sabitelerinin ( $K^T$ ) sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi

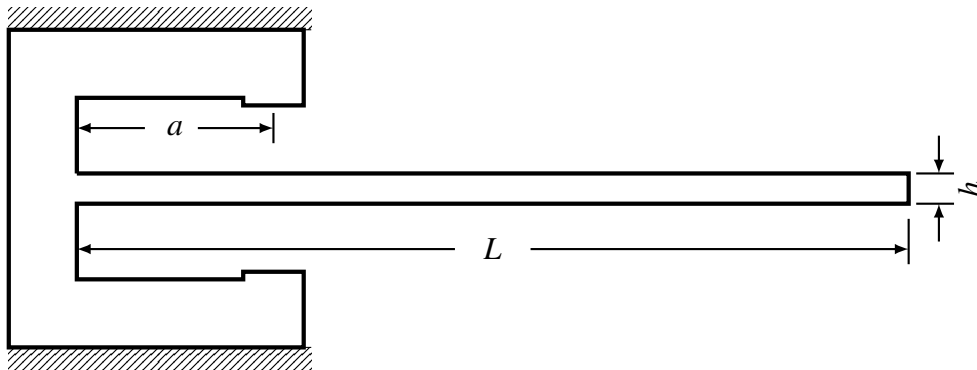


**Şekil 3.14:** PZNN-PZT kompozisyonlarının dielektrik sabitelerinin ( $g_{33}$ ) sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi

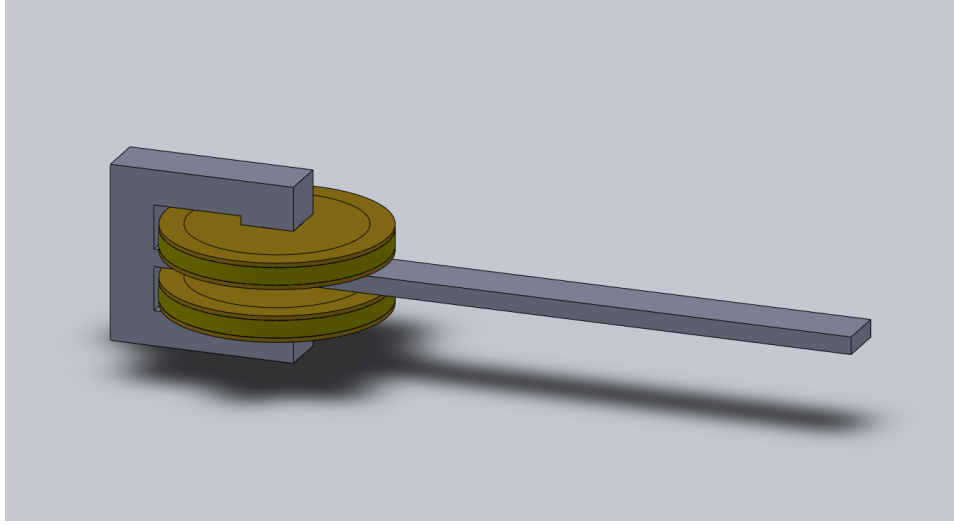
#### 4. ENERJİ HASATI SİSTEMİNİN MATEMATİK MODELİ

Titreşimden enerji hasatı gerçekleştirirken enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansının ( $f_{res}$ ) ortamdaki titreşimin frekansıyla örtüşmesi elde edilen enerjiyi en yüksek seviyeye taşıyacaktır [69]. Bundan dolayı bir enerji hasatı ünitesinin en önemli tasarım kriteri ünitenin rezonans frekansıdır. Enerji elde etmeye uygun titreşim kaynaklarının (otomobil motoru, çamaşır kurutucusu, vb.) titreşim ivmelerinin genlikleri genellikle  $20 \text{ m/s}^2$ 'den az ve titreşim frekansları da  $200 \text{ Hz}$ 'ten düşüktür [22]. Enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansını düşük seviyelere indirebilmek amacıyla Şekil 4.1'de görülen metalik çubuk yapısı kullanılmıştır. Bu çalışmada ankastre mesnetli bir çubuk ve iki adet zil tipi transdüser kullanılarak bir enerji hasatı ünitesi oluşturulmuştur. Sistemin rezonans frekansını ( $f_{res}$ ) etkileyen parametreleri belirlemek amacıyla bir matematiksel model oluşturulmuştur.

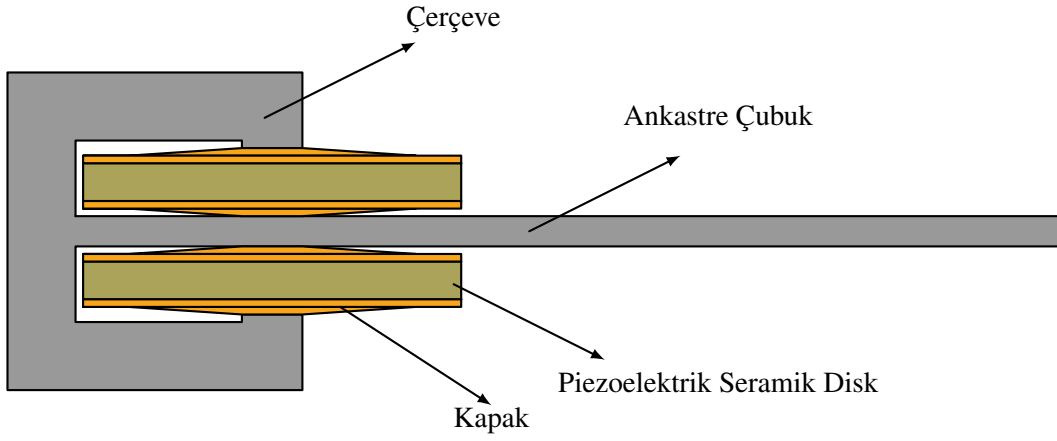
Bu çalışmada kullanılan enerji hasatı ünitesinde zil tipi transdüserler yay-sönümleyici ikilisi olarak davranmaktadırlar. Ancak matematiksel modelin basitleştirilmesi amacıyla elektromekanik dönüşümlerden kaynaklanan sönümlenmeler ihmal edilmiştir. Dolayısıyla transdüserler yığın yay elemanlar olarak modellenmişlerdir. Enerji hasatı ünitesinin modelini oluşturmak için uygun bir model olarak [70] Euler-Bernoulli çubuk modeli benimsenmiştir. Euler-Bernoulli teorisi, uzunluğunun ölçüsü genişliğine göre en az 10 kat daha fazla olan ve çubuğun deplasmanının genişliğine göre küçük olduğu durumlar için kullanılabilir [71–73].



Şekil 4.1: Ankastre mesnetli çubuk yapısı



(a)



(b)

**Şekil 4.2:** (a) Piezoelektrik enerji hasatı ünitesi ve (b) bileşenleri

Uniform bir Euler-Bernoulli çubuğunun titreşim davranışı için hareket denklemi şu şekilde verilir [72];

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ EI \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} \right] = \omega^2 \rho A Y(x), \quad 0 < x < L \quad (4.1)$$

Bu denklemde  $Y(x)$  çubuğun deplasmanı,  $\rho$  çubuğun malzemesinin birim uzunluk başına yoğunluğu,  $A$  çubuğun kesit alanı,  $E$  çubuğun malzemesinin elastik modülü ve  $I$  da alan eylemsizlik momentidir. Dikdörtgen kesitli bir çubuk için alan eylemsizlik momentini

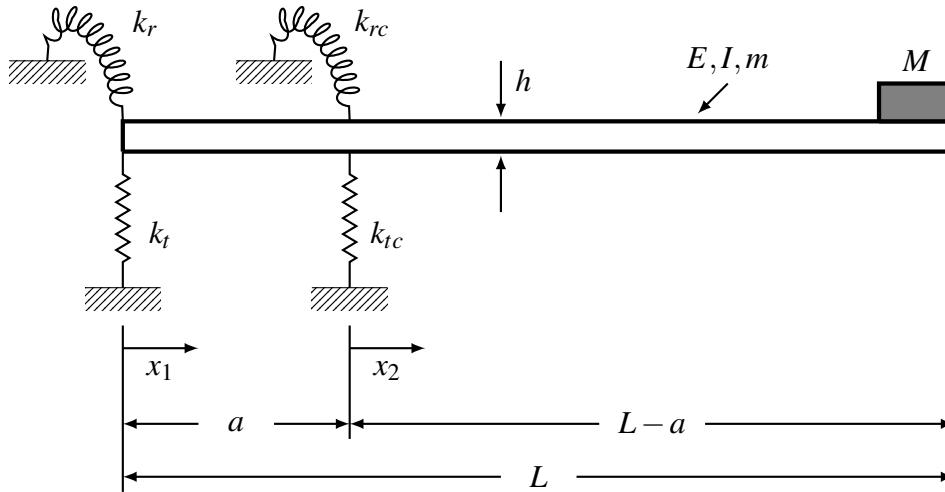
$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.2)$$

denklemleriyle verilir. Burada  $b$  çubuğun genişliği,  $h$  de yüksekliği (kalınlığı) olarak tanımlanmış değişkenlerdir. Uniform ankastre mesnetli Euler-Bernoulli çubuğu Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Çubuğun ankastre mesnetlenmiş ucunda deformasyonun dönele ve doğrusal hareketleri söz konusudur. Dolayısıyla çubuğun sol ucunda öteleme ve dönme deformasyonlarını modelleyecek şekilde  $k_t$  ve  $k_r$  şeklinde iki yay eklenmiştir. Aynı şekilde transdüserlerin bulunduğu noktalarda da ( $x_1 = a$ ) dönele ve doğrusal deformasyonları modellemek amacıyla  $k_{tc}$  ve  $k_{rc}$  şeklinde iki adet yay eklenmiştir.

Yay sabiteleri olan  $k_t$ ,  $k_r$ ,  $k_{tc}$  ve  $k_{rc}$  değerlerini bulmak amacıyla aşamalı bir çalışma yürütülmüştür. Son aşamada ise uç kütlesi ( $M$ ) sisteme ilave edilmiştir.

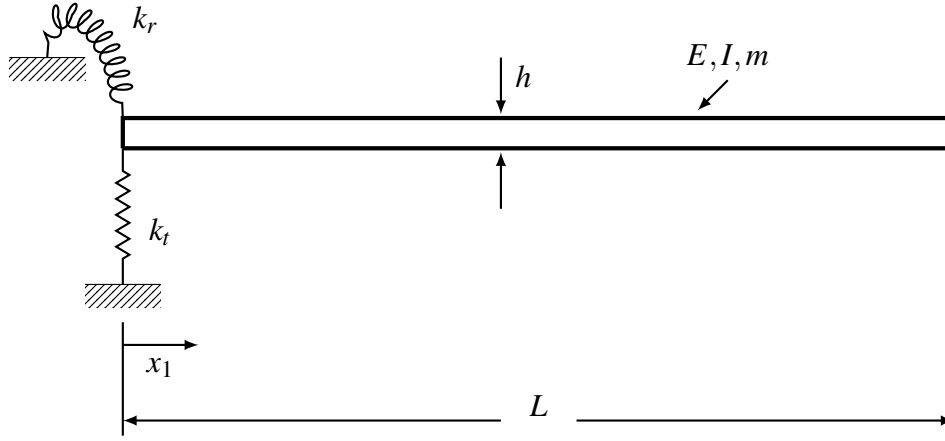
#### 4.1 Ankastre Çubuk Modeli

Öncelikle Şekil 4.1’de görülen çubuk yapısı kullanılarak  $k_t$  ve  $k_r$  değerleri bulunacaktır.



Şekil 4.3: Enerji Hasatı Ünitesi için önerilen model

Eşitlik 4.1 şu şekilde yazılabilmektedir:



**Şekil 4.4:** Dönme ( $k_r$ ) ve öteleme ( $k_t$ ) deformasyonlarını ifade eden yayların sistemde modellenmesi

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = \beta^4 Y(x), \quad 0 < x < L; \quad \beta^4 = \frac{\omega^2 m}{EI} \quad (4.3)$$

Şekil 4.1’de verilen uniform Euler-Bernoulli çubuğu için deplasman eşitlikleri şu şekilde ifade edilmektedir

$$Y_1(x_1) = A_1 \sin \beta x_1 + A_2 \cos \beta x_1 + A_3 \sinh \beta x_1 + A_4 \cosh \beta x_1 \quad (4.4)$$

Burada  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  and  $A_4$  sabitleri çubuğun her bir ucundaki ikişer sınır koşulu ile belirlenmektedir. Çubuğun sol ucu (Şekil 4.4) için sınır koşulları şu şekilde verilmektedir:

$$EI(x) \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} - k_r \frac{dY_1(x_1)}{dx_1} = 0, \quad x_1 = 0 \quad (4.5)$$

ve

$$-\frac{d}{dx_1} \left[ EI(x_1) \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} \right] - k_t Y_1(x_1) = 0, \quad x_1 = 0 \quad (4.6)$$

Çubuğun sağ ucu (Şekil 4.4) için sınır koşulları şu şekilde verilmektedir:

$$\frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} = 0, \quad x_1 = L \quad (4.7)$$

$$\frac{d^3 Y_1(x_1)}{dx_1^3} = 0, \quad x_1 = L \quad (4.8)$$

Sınır koşulları deformasyonun ( $Y_1(x_1)$ ) birinci, ikinci ve üçüncü dereceden diferansiyellerini içermektedir. Bunlar;

$$\frac{dY_1(x_1)}{dx_1} = \beta (A_1 \cos \beta x_1 - A_2 \sin \beta x_1 + A_3 \cosh \beta x_1 + A_4 \sinh \beta x_1) \quad (4.9)$$

$$\frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} = \beta^2 (-A_1 \sin \beta x_1 - A_2 \cos \beta x_1 + A_3 \sinh \beta x_1 + A_4 \cosh \beta x_1) \quad (4.10)$$

$$\frac{d^3 Y_1(x_1)}{dx_1^3} = \beta^3 (-A_1 \cos \beta x_1 + A_2 \sin \beta x_1 + A_3 \cosh \beta x_1 + A_4 \sinh \beta x_1) \quad (4.11)$$

olarak yazılabilir. Denklemler 4.5 - 4.11 dikkate alınarak  $x=0$  konumundaki sınır koşulları

$$-\beta^3 (-A_1 + A_3) - \frac{k_t}{EI} (A_2 + A_4) = 0 \quad (4.12)$$

$$\beta (-A_2 + A_4) - \frac{k_r}{EI} (A_1 + A_3) = 0 \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer şekilde  $x=L$  konumundaki sınır koşulları

$$\beta^2 (-A_1 \sin \beta L - A_2 \cos \beta L + A_3 \sinh \beta L + A_4 \cosh \beta L) = 0 \quad (4.14)$$

$$\beta^3 (-A_1 \cos \beta L + A_2 \sin \beta L + A_3 \cosh \beta L + A_4 \sinh \beta L) = 0 \quad (4.15)$$

şeklinde yazılır. Son olarak denklemler 4.12 - 4.15 göz önüne alınarak, aşağıdaki çözüm matris oluşturulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \beta^3 & -\frac{k_t}{EI} & -\beta^3 & -\frac{k_t}{EI} \\ -\frac{k_r}{EI} & -\beta & -\frac{k_r}{EI} & \beta \\ -\beta^2 \sin\beta L & -\beta^2 \cos\beta L & \beta^2 \sinh\beta L & \beta^2 \cosh\beta L \\ -\beta^3 \cos\beta L & \beta^3 \sin\beta L & \beta^3 \cosh\beta L & \beta^3 \sinh\beta L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.16)$$

Denklem 4.16'nın determinantı sıfıra eşitlenerek tekil bir çözüm elde edilebilir.  $L$  ve  $EI$  değerleri bilindiğinde elde edilen çözüm sistemin doğal frekanslarını verecektir. Oluşturulan modelde kullanılan yay sabitleri olan  $k_t$  ve  $k_r$  değerlerini belirlemek için eşitlik 4.16'daki matrisin çözümü ile elde edilen sonuçlar modeli ele alınan yapının (Şekil 4.4) birinci titreşim modunun deneysel verilerinin karşılaştırılması gerekir. Söz konusu olan  $k_t$  ve  $k_r$  değerleri malzeme özellikleri ve çubuğun yapısına bağlı olarak değişim gösterir.

#### 4.2 Zil Tipi Transdüserler Eklenmiş Ankastre Çubuk Modeli

Bundan sonraki aşama transdüserlerin yay sabitlerini ( $k_{tc}$  ve  $k_{rc}$ ) belirlemektir (Şekil 4.5). Bu modelde iki farklı deplasman ifadesi yer almaktadır. Bunlar;

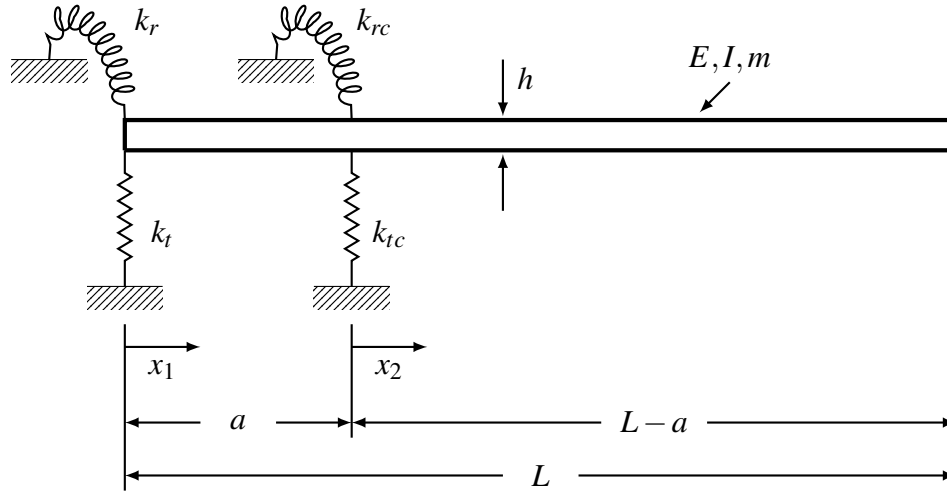
$$Y_1(x_1) = A_1 \sin\beta x_1 + A_2 \cos\beta x_1 + A_3 \sinh\beta x_1 + A_4 \cosh\beta x_1 \quad (4.17)$$

and

$$Y_2(x_2) = A'_1 \sin\beta x_2 + A'_2 \cos\beta x_2 + A'_3 \sinh\beta x_2 + A'_4 \cosh\beta x_2 \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $Y_1$  ve  $Y_2$  sırasıyla  $0 < x_1 < a$  ve  $0 < x_2 < L - a$ , aralıklarındaki deplasman değerlerini ifade etmektedir (Şekil 4.3). Bu sınır koşulları şu şekilde ifade edilmektedir;

$A_1, A_2, A_3, A_4, A'_1, A'_2, A'_3$  ve  $A'_4$  sabitleri sekiz adet sınır koşulunun tanımlanması ile elde edilmektedir.



**Şekil 4.5:** Enerji hasatı ünitesinin uç kütleli olmaksızın oluşturulan modeli (Transdüserler öteleme ( $k_{tc}$ ) ve dönme ( $k_{rc}$ ) deplasmanlarını ifade etmek üzere  $x_1 = a$  konumundaki iki adet eşdeğer yay ile ifade edilmiştir)

$$EI \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} - k_r \frac{dY_1(x_1)}{dx_1} = 0, \quad x_1 = 0 \quad (4.19)$$

$$-\frac{d}{dx_1} \left[ EI \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} \right] - k_t Y_1(x_1) = 0, \quad x_1 = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{d^2 Y_2(x_2)}{dx_2^2} = 0, \quad x_2 = L - a \quad (4.21)$$

$$\frac{d^3 Y_2(x_2)}{dx_2^3} = 0, \quad x_2 = L - a \quad (4.22)$$

Çubuğun  $x_1 = a$  konumunda deplasmanı ve dönme hareketi süreklilik arz eder ve

$$Y_1(x_1) \Big|_{x_1=a} = Y_2(x_2) \Big|_{x_2=0} \quad (4.23)$$

$$\frac{dY_1(x_1)}{dx_1} \Big|_{x_1=a} = \frac{dY_2(x_2)}{dx_2} \Big|_{x_2=0} \quad (4.24)$$

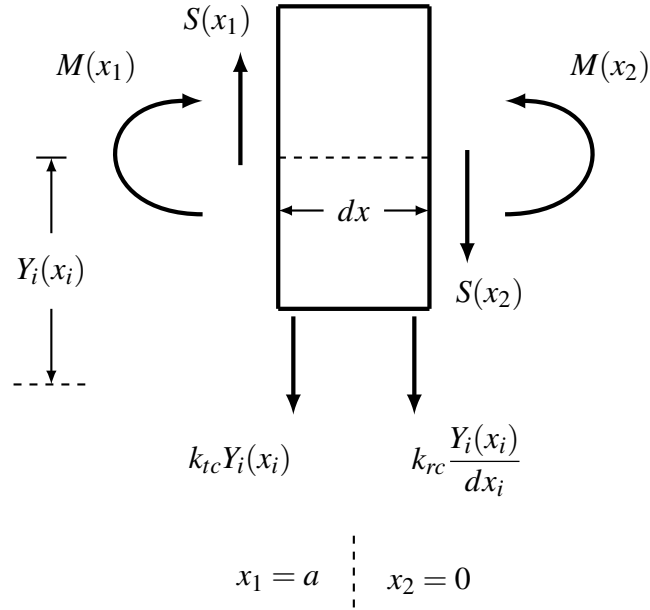
denklemleri ile verilir. Kuvvetlerin ve momentlerin sürekliliğinden (Şekil 4.6) elde edilen diğer iki sınır koşulu da

$$EI \frac{d^3 Y_1(x_1)}{dx_1^3} - k_{tc} Y_1(x_1) - EI \frac{d^3 Y_2(x_2)}{dx_2^3} = 0, \quad x_1 = a, x_2 = 0 \quad (4.25)$$

$$EI \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} + k_{rc} \frac{dY_1(x_1)}{dx_1} - EI \frac{d^2 Y_2(x_2)}{dx_2^2} = 0, \quad x_1 = a, x_2 = 0 \quad (4.26)$$

denklemleriyle verilmektedir.

Denklemler 4.17-4.26 kullanılarak denklem 4.27 oluşturulmaktadır.



**Şekil 4.6:** Çubuğun sonsuz küçük bir elemanının serbest cisim diyagramı

Denklem 4.27’de  $\kappa_t = -k_t/EI$ ,  $\kappa_r = -k_r/EI$ ,  $\lambda = \beta(L - a)$ ,  $\gamma = \beta a$ ,  $\kappa_{tc} = k_{tc}/(EI\beta^3)$  ve  $\kappa_{rc} = k_{rc}/(EI\beta)$  şeklindedir. Bu matrisin determinantı sıfıra eşitlenerek tekil bir çözüm bulunur ve  $k_t$ ,  $k_r$ ,  $k_{tc}$ ,  $k_{rc}$ ,  $L$ ,  $a$ ,  $EI$  değerlerinin bilindiği varsayıldığında sistemin doğal frekansları elde edilebilmektedir.

Şekil 4.5’da görülen sistemin birinci titreşim modunun doğal frekansı için deneysel veriler ile denklem 4.27’den elde edilen sonuçlar eşitlendiğinde  $k_{tc}$  ve  $k_{rc}$  değerleri elde edilecektir. Bu değerler transdüserlerin özelliklerine (piezoelektrik malzemenin özellikleri, kapak geometrisi ve kapak malzemesinin özellikleri) bağlı olarak değişim göstermektedir.

$$\begin{bmatrix}
\beta^3 & \kappa_t & -\beta^3 & \kappa_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\kappa_r & -\beta & \kappa_r & \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\lambda & -\cos\lambda & \sinh\lambda & \cosh\lambda \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\cos\lambda & \sin\lambda & \cosh\lambda & \sinh\lambda \\
\sin\gamma & \cos\gamma & \sin\gamma & \cosh\gamma & 0 & -1 & 0 & -1 \\
\cos\gamma & -\sin\gamma & \cosh\gamma & \sinh\gamma & -1 & 0 & -1 & 0 \\
-\cos\gamma & \sin\gamma & \cosh\gamma & \sinh\gamma & 1 & 0 & -1 & 0 \\
-\kappa_{rc}\sin\gamma & -\kappa_{rc}\cos\gamma & -\kappa_{rc}\sin\gamma & -\kappa_{rc}\cosh\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\sin\gamma & -\cos\gamma & \sin\gamma & \cosh\gamma & 0 & 1 & 0 & -1 \\
+\kappa_{rc}\cos\gamma & -\kappa_{rc}\sin\gamma & +\kappa_{rc}\cosh\gamma & +\kappa_{rc}\sinh\gamma & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
A_1 \\
A_2 \\
A_3 \\
A_4 \\
A'_1 \\
A'_2 \\
A'_3 \\
A'_4
\end{bmatrix}
= 0$$

(4.27)

### 4.3 Zil Tipi Transdüserler ve Uç Kütle Eklenmiş Ankastre Çubuk Modeli

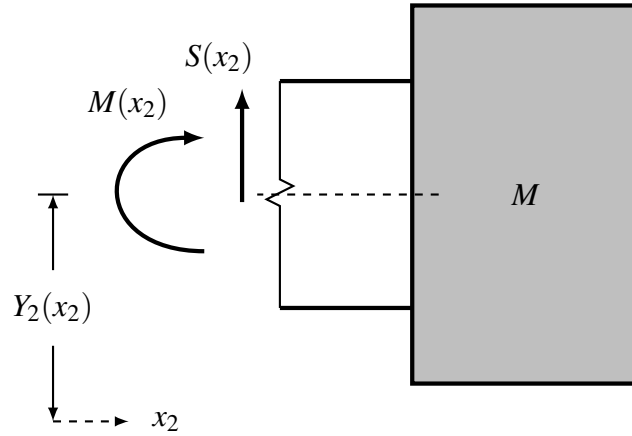
Son aşama olarak sisteme bir uç kütle eklenmiştir (Şekil 4.3). Bu durumda çubuğun sağ ucunun serbest cisim diyagramı Şekil 4.7’de görüldüğü gibi olacaktır. Çubuğun sağ ucu için sınır koşulları

$$\frac{d^3 Y_2(x_2)}{dx_2^3} = -M \omega^2 Y_2(x_2), \quad x_2 = L - a \quad (4.28)$$

ve dönel eylemsizliği ihmal ederek (Euler-Bernoulli çubuk teorisi kullanıldığından dolayı)

$$\frac{d^2 Y_2(x_2)}{dx_2^2} = 0, \quad x_2 = L - a \quad (4.29)$$

şeklinde yazılmaktadır. Diğer sınır koşulları Denklemler 4.19, 4.20, 4.23, 4.24, 4.25 ve 4.26’da verilmiştir.



**Şekil 4.7:** Çubuğun kütle eklenmiş halindeki sağ ucunun serbest cisim diyagramı

Bu denklemler kullanılarak denklem 4.30 elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix}
\beta^3 & \kappa_t & -\beta^3 & \kappa_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\kappa_r & -\beta & \kappa_r & \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\lambda & -\cos\lambda & \sinh\lambda & \cosh\lambda & \\
0 & 0 & 0 & 0 & +\omega^2 M \sin\lambda & +\omega^2 M \cos\lambda & +\omega^2 M \sinh\lambda & +\omega^2 M \cosh\lambda & \\
\sin\gamma & \cos\gamma & \sin\gamma & \cosh\gamma & 0 & -1 & 0 & -1 & \\
\cos\gamma & -\sin\gamma & \cosh\gamma & \sinh\gamma & -1 & 0 & -1 & 0 & \\
-\cos\gamma & \sin\gamma & \cosh\gamma & \sinh\gamma & 1 & 0 & -1 & 0 & \\
-\kappa_c \sin\gamma & -\kappa_c \cos\gamma & -\kappa_c \sin\gamma & -\kappa_c \cosh\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & \\
-\sin\gamma & -\cos\gamma & \sin\gamma & \cosh\gamma & 0 & 1 & 0 & -1 & \\
+\kappa_c \cos\gamma & -\kappa_c \sin\gamma & +\kappa_c \cosh\gamma & +\kappa_c \sinh\gamma & 0 & 0 & 0 & -1 & 
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
A_1 \\
A_2 \\
A_3 \\
A_4 \\
A'_1 \\
A'_2 \\
A'_3 \\
A'_4
\end{bmatrix}
= 0 \tag{4.30}$$

Denklem 4.30'un determinantı sıfıra eşitlendiğinde tekil bir çözüm elde edilecektir. Sistem parametreleri olan  $k_t$ ,  $k_r$ ,  $k_{tc}$ ,  $k_{rc}$ ,  $L$ ,  $a$ ,  $EI$  ve  $M$  değerleri bilindiğinde bu çözüm bize sistemin doğal frekanslarını verecektir.

Bütün bu parametreler göz önüne alınarak bir parametrik çalışma yapılması gerekmektedir. ANSYS Workbench Sonlu Elemanlar Analizi platformu ile bu parametrelerin rezonans frekansı ( $f_{res}$ ) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi çalışmasında elektromekanik etkileşimler ihmal edilmiştir.

## 5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Daha önce belirtildiği gibi rezonans frekansı enerji hasatı sistemlerinin en önemli parametresidir. Binalar ve insanoğlu eliyle üretilen yapılarda oluşan titreşimlerin çoğunluğu 200 Hz'in altındaki frekanslardadır [22]. Dolayısıyla tasarlanan enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansını ( $f_{res}$ ) 200 Hz'in altında ve çubuğun uzunluğunu mümkün olan en kısa ölçüde tutacak şekilde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada metal bir çerçeve, ankastre bir çubuk, iki adet zil tipi transdüser ve bir uç kütesinden oluşan enerji hasatı ünitesi esas alınmıştır.

### 5.1 Tasarım

Transdüserlerin geometrik ve mekanik özellikleri ile çubuğun mekanik özellikleri bu çalışmada önceden belirlenen özelliklerdir ve bu özellikler Çizelge 6.2 ile Çizelge 5.2'de verilmiştir.

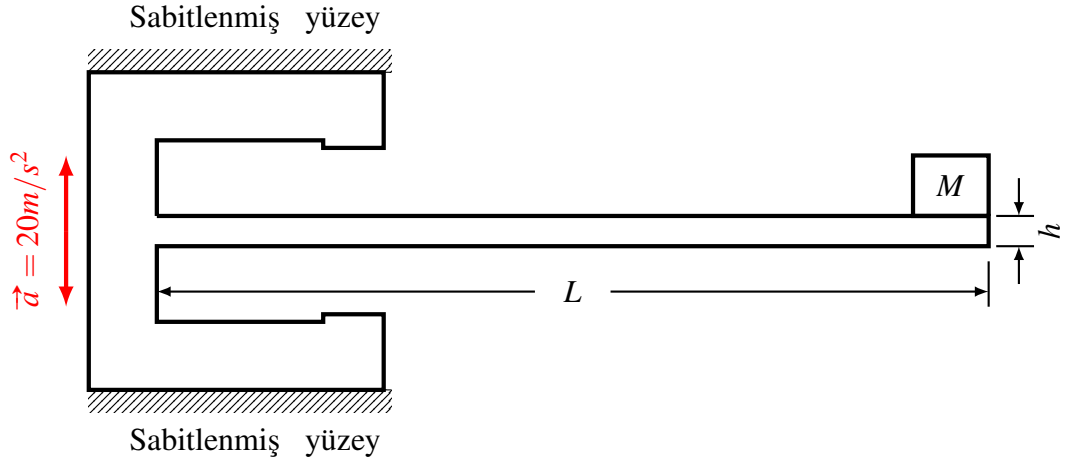
Ankastre mesnetlenmiş çelik çubuğun sonlu elemanlar analizinde kullanılan tasarım parametreleri Şekil 5.1 ve Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Denklem 4.30'da açıkça görüldüğü üzere enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansı uç kütesinin ( $M$ ), çubuğun doğrusal ( $k_t$ ) ve dönel ( $k_r$ ) katılığının ve geometrik özelliklerinin ( $L, b, h$ ), transdüserlerin doğrusal ( $k_{tc}$ ) ve dönel ( $k_{rc}$ ) katılığının bir fonksiyonudur.

Buradan hareketle, sözü geçen parametrelerin sistemin rezonans frekansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir Sonlu Elemanlar Analizi çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada ANSYS Workbench Sonlu Elemanlar Analizi platformu (ANSYS Inc. Canonsburg, PA) kullanılmıştır.

Bu çalışmada incelenen modelin ilk 3 titreşim modu Şekil 5.2'de verilmiştir. Enerji hasatı ünitesinin tasarımı açısından bu çalışmada yalnızca sistemin birinci titreşim modu kullanılmıştır.

Çubuğun genişliği transdüserlerin tepe çapı ile aynı olacak şekilde 3 mm olarak seçilmiştir. Çelik yapının üretiminde EDM yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin getirdiği bir kısıt olarak çubuk kalınlığı en az 0.5 mm olabilmektedir.



**Şekil 5.1:** Ankastre mesnetli çubuk yapısı için tasarım parametreleri

**Çizelge 5.1:** Sonlu Elemanlar Analizi çalışmasında kullanılan tasarım parametrelerinin değişimi

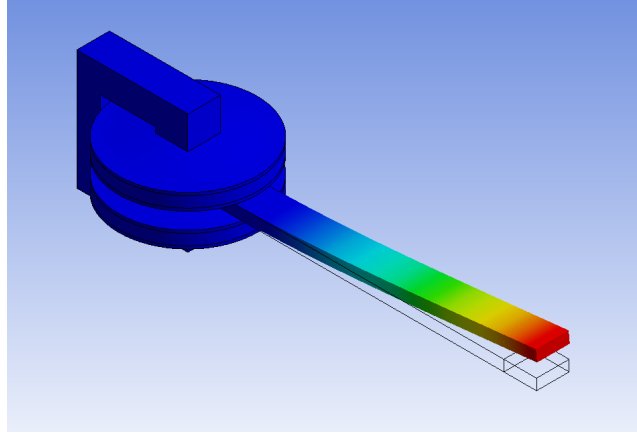
	Çubuk Kalınlığı ( $h$ ) (mm)	Çubuk Uzunluğu ( $L$ ) (mm)	Uç kütle ( $M$ ) (g)
Değişim Aralığı	0.5	30 - 50	0 - 0.68
Değişim Basamağı	-	5	0.17

Bundan daha ince çubuklar üretim aşamasında şekilsel deformasyona uğramaktadır. Bundan dolayı çubuk kalınlığı 0.5 mm olarak seçilmiştir. Dolayısıyla geriye kalan parametreler olan uzunluk ( $L$ ) ve uç kütle ( $M$ )  $f_{res}$  üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

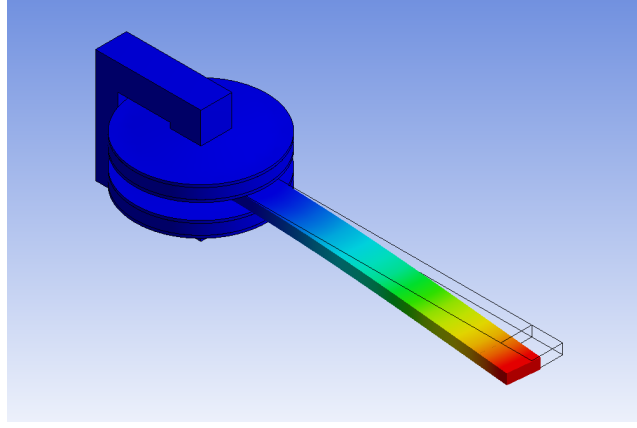
Çubuk uzunluğu 30 mm ile 50 mm aralığında ve 5 mm'lik basamaklar halinde değiştirilmiştir. (Çizelge 5.1). Rezonans frekansını daha da düşürmek ve transdüserlerde daha fazla deformasyon yaratabilmek amacıyla uç kütle eklenmiş ve bu uç kütle de 0.68 g'a kadar, 0.17 g'lık basamaklar şeklinde artırılarak uygulanmıştır.

**Çizelge 5.2:** Sonlu Elemanlar Analizi çalışmasında kullanılan malzemelerin özellikleri

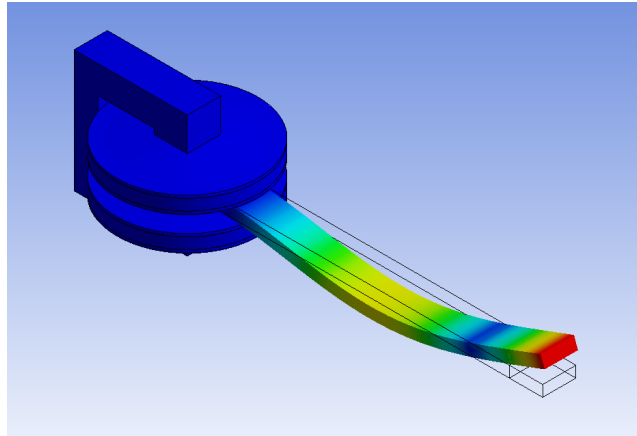
Özellik	Çelik	Pirinç	Yumuşak PZT
Young Modülü ( <i>GPa</i> )	210	110	54
Poisson Oranı	0.3	0.331	0.34
Yoğunluk ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	7850	8525	7500



(a)



(b)

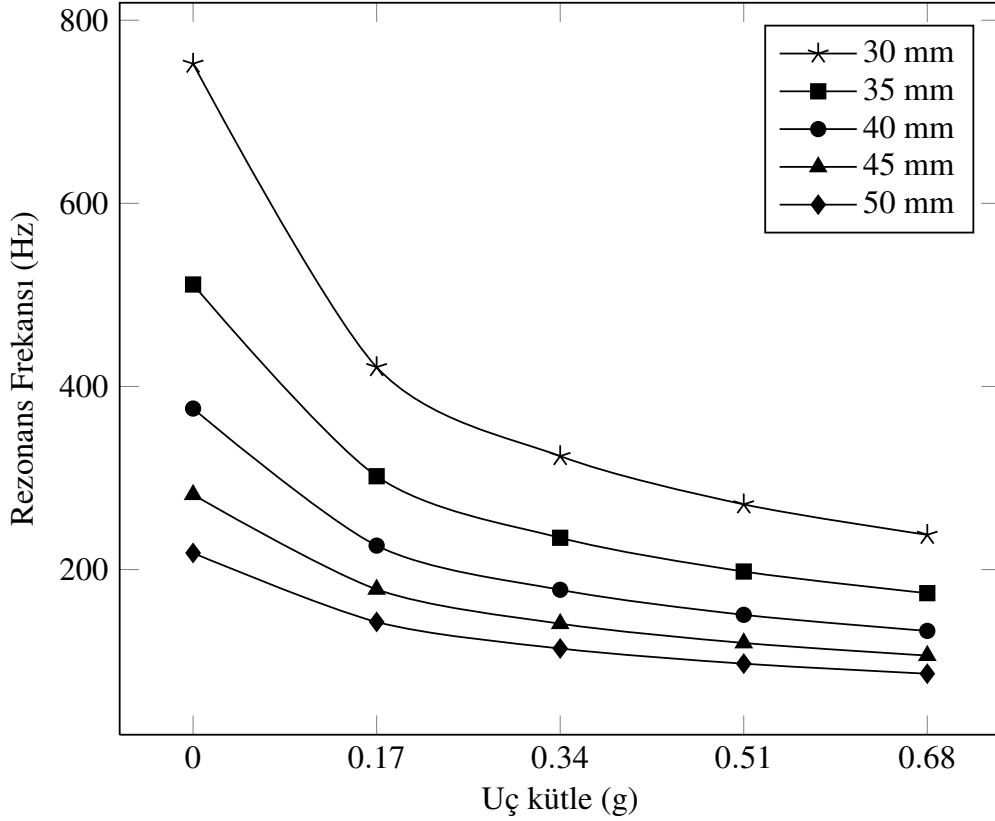


(c)

**Şekil 5.2:** Enerji hasatı ünitesinin (a) Birinci düzlem dışı, (b) birinci düzlem içi ve (c) ikinci düzlem dışı titreşim modları

## 5.2 Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Şekil 5.3'te çubuk uzunluğu ve uç kütesinin  $f_{res}$  üzerine etkileri verilmiştir. Buradan görülmektedir ki  $L=40\text{mm}$ ,  $a=7\text{mm}$  and  $h=0.5\text{mm}$  ölçülerinde olan bir çubuk için  $f_{res}$ , 368 Hz gibi düşük frekanslara indirilebilmektedir.



Şekil 5.3: Çubuk uzunluğu ve uç kütleyle bağlı olarak rezonans frekansının değişimi

- Çubuk uzunluğu 30 mm'den 40 mm'ye çıkarıldığında;
  - Uç kütle bulunmayan çubuğun rezonans frekansı 753 Hz'ten 368 Hz'e düşmüştür.
  - Uç kütle 0.68g olan çubuğun rezonans frekansı 238 Hz'ten 133 Hz'e düşmüştür.
- Çubuk uzunluğu 40 mm'den 50 mm'ye çıkarıldığında;
  - Uç kütle bulunmayan çubuğun rezonans frekansı 368 Hz'ten 218 Hz'e düşmüştür.

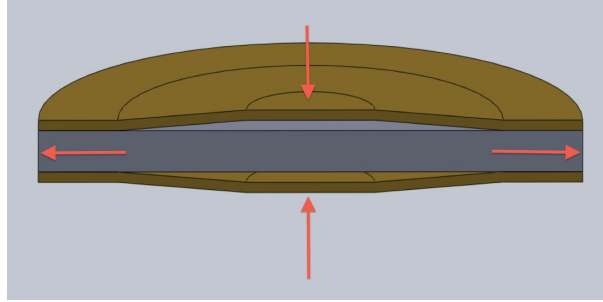
- Uç kütlesi 0.68g olan çubuğun rezonans frekansı 133 Hz'ten 86 Hz'e düşmüştür.
- Uç kütlesi 0.17 g'dan 0.68 g'a çıkartıldığında;
  - En kısa (30 mm) çubuğun rezonans frekansı 302 Hz'ten 174 Hz'e düşmüştür.
  - 40 mm uzunluğundaki çubuğun rezonans frekansı 226 Hz'ten 133 Hz'e düşmüştür.
  - En uzun (50 mm) çubuğun rezonans frekansı 143 Hz'ten 86 Hz'e düşmüştür.

Sonlu Elemanlar Analizi çalışmasının sonuçları rezonans frekansının ( $f_{res}$ ) hem çubuğun uzunluğu ( $L$ ) hem de uç kütle ( $M$ ) tarafından etkilendiğini göstermektedir. Beklendiği üzere çubuk uzunluğu arttıkça  $f_{res}$  azalmaktadır. Aynı uzunluk ve kalınlığa sahip çubuk için uç kütle arttıkça  $f_{res}$  yine azalmaktadır.

Kullanılan üretim yöntemi gereğince çubuğun kalınlığı en az 0.5 mm olabilmektedir. Dolayısıyla 200 Hz'ten daha düşük bir rezonans frekansını 0.5 mm kalınlıktaki bir çubukta elde edebilmek için çubuk uzunluğu en az 40 mm olmalıdır. 35 mm uzunluğundaki bir çubuk da 174 Hz ile 511 Hz arasında değişen rezonans frekanslarına sahiptir. Ancak Eşitlik 1.16 gereğince elde edilecek en yüksek miktardaki enerjiyi mümkün olan en düşük frekansta elde edebilmek amacıyla 0.5 mm kalınlık ve 40 mm uzunluğunda bir çubuk tercih edilmiştir. Çubuk uzunluğu daha da arttırıldığında rezonans frekansı düşecek ancak uç kütleinin titreşim hareketinin transdüserlere iletimi çubuğun elastik deformasyon miktarının artmasından dolayı azalacaktır.

## 6. ZİL TİPİ TRANSDÜSERLERLE ENERJİ HASATI

Bu çalışmada kullanılan transdüserler zil tipi transdüserlerdir. Zil tipi transdüserler Newnham ve Doğan [74] tarafından geliştirilmişlerdir ve disk şeklindeki bir elektro-aktif seramiğin iki paralel yüzeyine konik şekilli iki metal kapağın yapıştırılması ile oluşturulmaktadır (Şekil 6.1). Bu aşamada amaç farklı malzeme ve farklı katmanlama ile birlikte zil tipi transdüserlerin enerji hasatı performanslarını değerlendirmektir.



**Şekil 6.1:** Zil tipi transdüser

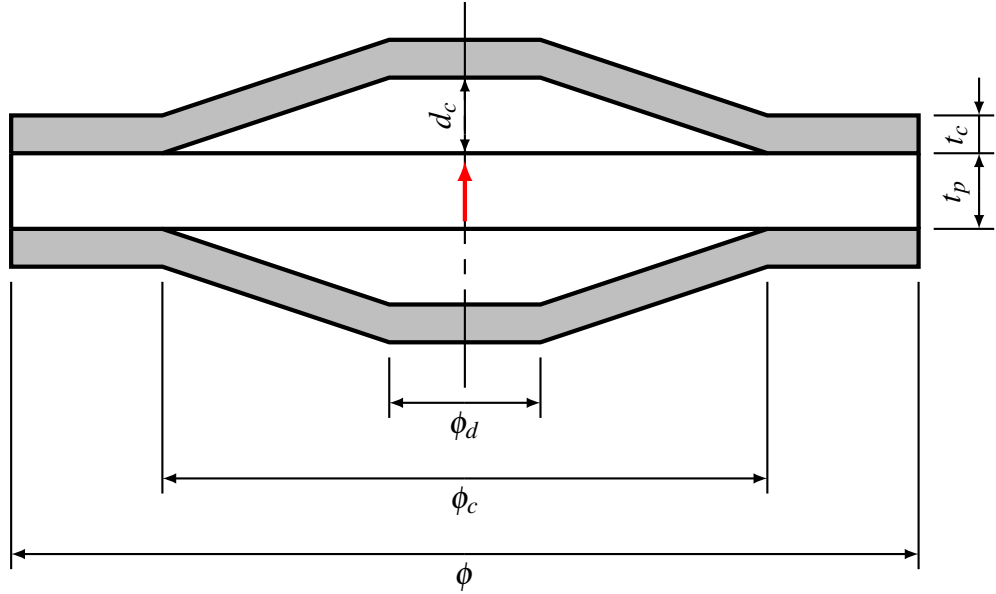
Kapaklar seramik diske yaklaşık 20  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir tabaka oluşturulacak şekilde epoksi yapıştırıcı (Eccobond 45 LV ve Catalyst 15 LV (3 : 1 oranında), Emerson and Cuming Inc., Woburn, MA) ile yapıştırılmaktadır. Yapıştırıcının gerekli mukavemeti kazanması için 50  $^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat süreyle sertleşmesi beklenmektedir. Bu aşamada metal kapaklar ve seramik diskin ısıl genleşme katsayısındaki farktan dolayı farklı oranda genleşmeleri sonucu yapıştırma işlemi nihayetinde seramik disk üzerinde basma gerilmeleri oluşmaktadır. Seramik malzemelerin basma gerilmeleri altında çalışması mekanik mukavemetleri gereği daha uygun olduğundan dolayı bu durum zil tipi transdüserlerin avantajlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan zil tipi transdüserlerde üç farklı elektro-aktif disk kullanılmıştır.

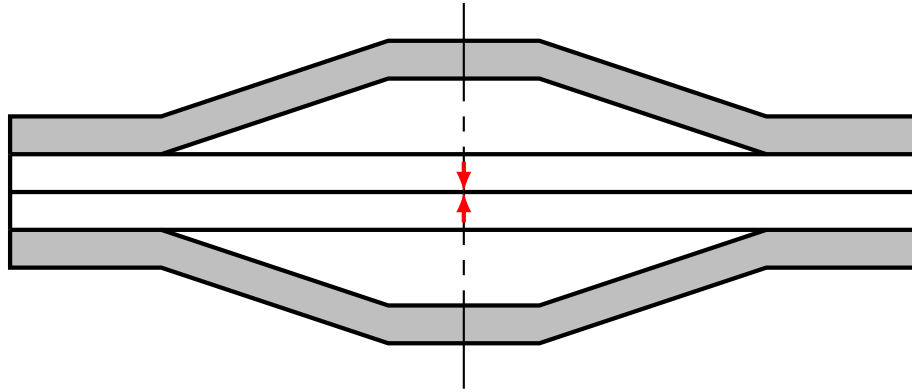
1. PZT 5H tipi yumuşak piezoelektrik kompozisyondan üretilmiş, tek katmanlı (Şekil 6.2), 1 mm kalınlığında yığın seramik disk kullanılarak (C-PZT1 transdüser)

2. PZT 5H tipi yumuşak piezoelektrik kompozisyondan üretilmiş, 0.5 mm kalınlığındaki iki katmandan oluşan (şekil 6.3) ve toplam 1 mm kalınlığında disk kullanılarak (C-PZT2 transdüser).
3. PZNN-PZT tipi yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik kompozisyondan üretilmiş, tek katmanlı, 1 mm kalınlığında yığın seramik disk kullanılarak (C-PZNN1 transdüser).

Kullanılan piezoelektrik seramik kompozisyonlarının özellikleri Çizelge 6.1'de görölmektedir. Tek katman ve iki katmandan oluşan farklı kombinasyonlar şekil 6.2 ve şekil 6.3'te ve bu kombinasyondaki transdüserler için ölçüler Çizelge 6.2'de verilmiştir.



**şekil 6.2:** Tek tabakalı seramik disk ile oluşturulan zil tipi transdüser (C-PZT1 ve C-PZNN1) (Kırmızı ok polarizasyon yönünü göstermektedir)



**Şekil 6.3:** İki tabakalı seramik disk ile oluşturulan zil tipi transdüser (C-PZT2)  
(Kırmızı ok polarizasyon yönünü göstermektedir)

**Çizelge 6.1:** Zil tipi transdüserlerde kullanılan piezoelektrik seramik kompozisyonlarının özellikleri

Malzeme	$d_{33}$ ( $10^{-12}C/N$ )	$k_p$	$K^T$	$g_{33}$ ( $V/mN$ )	$d_{33} \cdot g_{33}$ ( $10^{-12}m^2/N$ )
PZT 5H	650	0.77	3800	0.019	12.5
PZNN-PZT	275	0.59	560	0.055	15.3

**Çizelge 6.2:** Deneysel çalışmalarda kullanılan zil tipi transdüserlerin ölçüleri

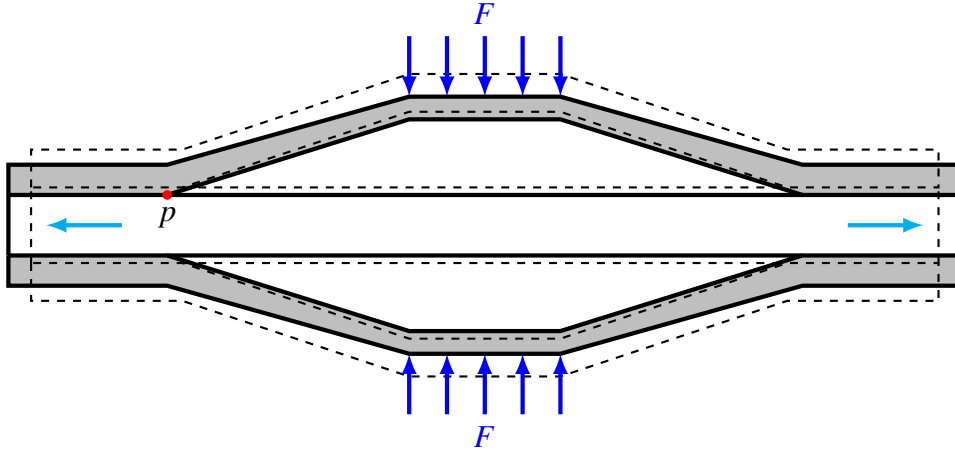
Parametre	Ölçü (mm)
Metal Kalınlığı ( $t_c$ )	0.25
Boşluk Çapı ( $\phi_c$ )	10.7
Boşluk Derinliği ( $d_c$ )	0.25
Piezoelektrik Disk Kalınlığı ( $t_p$ )	1
Transdüser Çapı ( $\phi$ )	12.7
Tepe Çapı ( $\phi_d$ )	3

## 6.1 Zil Tipi Transdüserin Yapısı

Zil tipi transdüserlerde 3-3 ve 3-1 titreşim modlarının karma bir etkisi söz konusudur ve etkin piezoelektrik yük sabitesi şu şekilde verilmektedir:

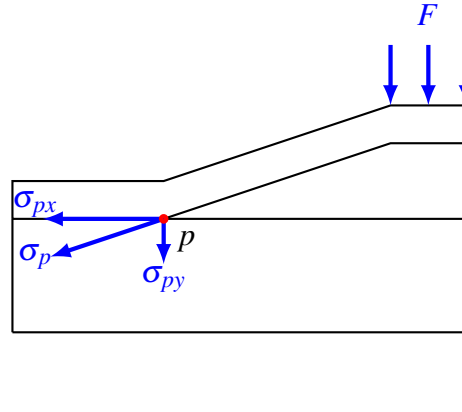
$$d_{\text{eff}} = d_{33} + A|d_{31}| \quad (6.1)$$

Burada A yükseltme faktörüdür ve transdüserin kapak tasarımına bağlı olarak 10 ile 100 arasında değişen değerler alabilir. Mekanik yükseltme, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te görüldüğü gibi kapağın tepe noktasına uygulanan kuvvetin seramik diske aksenal ve dairesel kuvvetler olarak iletilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu iki şekilde de görülen  $p$  noktasındaki gerilme ( $\sigma_p$ ) x ve y eksenlerinde olmak üzere sırasıyla  $\sigma_{px}$  ve  $\sigma_{py}$  şeklinde iki bileşenle ifade edilebilir.



**Şekil 6.4:** Uygulanan aksenal kuvvete karşılık zil tipi transdüserde oluşan tepki

Uygulanan aksenal kuvvetlere karşılık zil tipi transdüserde oluşan tepkiyi modellemek amacıyla Kim [75] Belleville yayı benzerliğini kullanmıştır. Bu yaklaşımda kapağı seramiğe yapıştırmakta kullanılan bağlayıcı tabakanın kalınlığı ihmal edilmiştir. Dolayısıyla kapak ile seramik arasında kayma olmadığı kabul edilmektedir. Kim söz konusu çalışmasında zil tipi transdüserde etkiyen kuvvetleri hesaplamak için [75], Almen ve László'nun [76] formülasyonunu kullanmıştır. Bu çalışmada ise günümüzde hesaplamalarda yaygın olarak kullanılan daha detaylı bir formülasyon ile çalışılmıştır. [77]. Şekil 6.6'da verilen Belleville yayı, zil



**Şekil 6.5:** Transdüser'e etki eden kuvvetler

tipi transdüserlerin kapaklarını modellemekte kullanılmıştır. Burada uygulanan  $F$  kuvveti ve  $p$  noktasında oluşan gerilme sonucu oluşan çökme ( $s$ ) şu şekilde ifade edilmektedir [77]:

$$F = \frac{4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 D_e^2} \cdot K_4^2 \cdot \frac{s}{t} \left[ K_4^2 \cdot \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{t} \right) \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) + 1 \right] \quad (6.2)$$

$$\sigma_p = -\frac{4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{s}{t} \left[ K_4 \cdot (K_2 - 2K_3) \cdot \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) - K_3 \right] \quad (6.3)$$

Burada  $h_0$  yük altında olmayan tekil bir yayın koni yüksekliği ( $h_0 = l_0 - t$ ),  $\mu$  Poisson oranı,  $\delta$  çap oranı ( $\delta = D_e/D_i$ ),  $E$  Young Modülü,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  ve  $K_4$  de hesaplama sabiteleridir.  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  ve  $K_4$  şu şekilde verilmektedir:

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left( \frac{\delta - 1}{\delta} \right)^2}{\frac{\delta + 1}{\delta - 1} - \frac{2}{\ln \delta}} \quad (6.4)$$

$$K_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\frac{\delta - 1}{\ln \delta} - 1}{\ln \delta} \quad (6.5)$$

$$K_3 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\delta - 1}{\ln \delta} \quad (6.6)$$

$$K_4 = \sqrt{-\frac{C_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{C_1}{2}\right)^2 + C_1 + 1}} \quad (6.7)$$

Burada  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{1}{\frac{5}{32} \cdot \left(\frac{l_0}{t} - 1\right)^2} \quad (6.8)$$

ya da

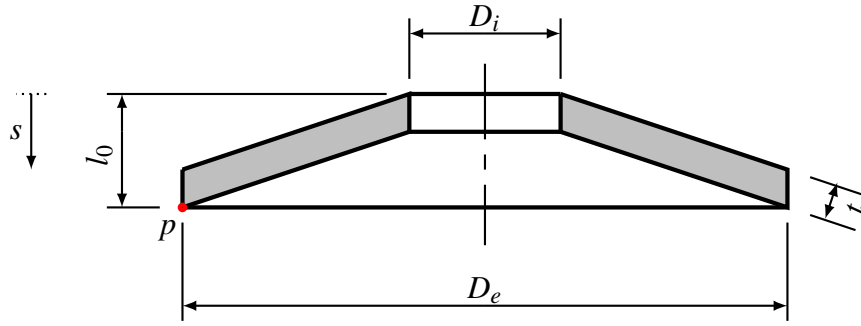
$$C_1 = \frac{32}{5} \cdot \left(\frac{h_0}{t}\right)^{-2} \quad (6.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

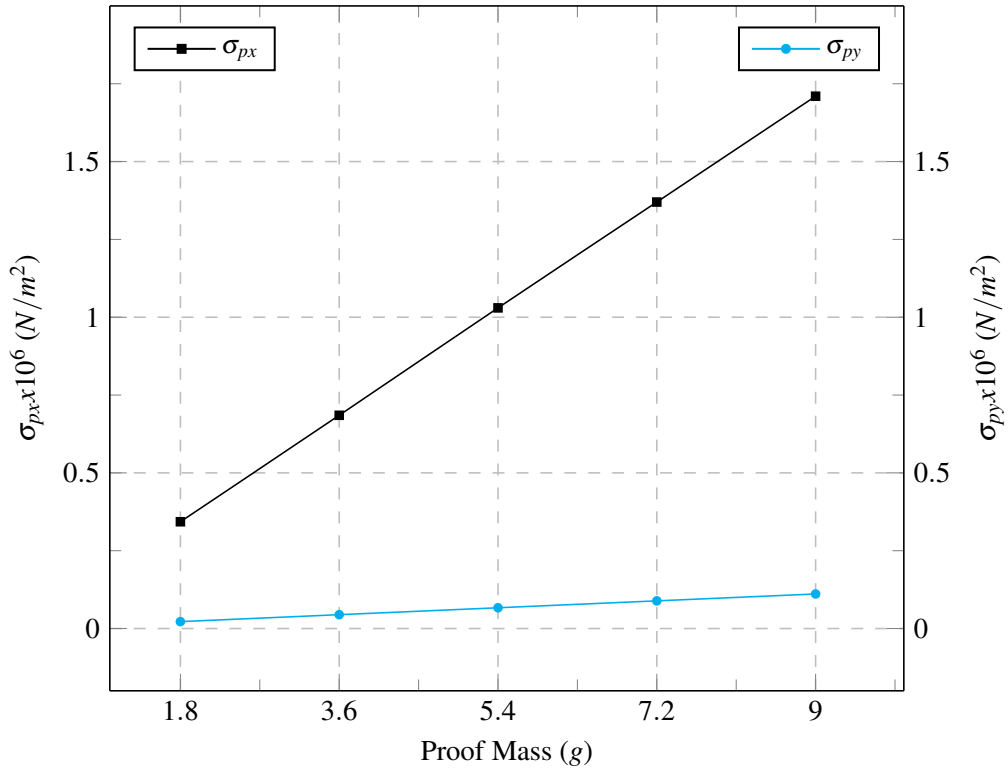
Kapak malzemesi olarak kullanılan pirincin Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.331, Young modülü ise 110 GPa'dır. Kapak geometrisi ve ölçüleri Şekil 6.2'de verilmiştir.

Transdüser, üzerine bağlı 1.8 gramlık ağırlıkla birlikte 2 g genlikli ivme ile titreştirildiğinde, transdüserin tepe noktasına gelen kuvvet  $3.6 \times 10^{-2}$  N olarak hesaplanmıştır. Bu kuvvet, kapakta  $3.9476 \times 10^{-7}$  m'lik bir çökmeye sebep olacak (Eq 6.2) ve bu çökme sonucunda da Eşitlik 6.3 kullanılarak  $p$  noktasındaki gerilme ( $\sigma_p$ )  $3.4328 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> olarak hesaplanacaktır. Dairesel ( $\sigma_{px}$ ) ve eksenel ( $\sigma_{py}$ ) yöndeki gerilmeler de sırasıyla  $3.4256 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> ve  $2.2244 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Şekillerde verilmiş olan  $p$  noktasında oluşan dairesel ( $\sigma_{px}$ ) ve eksenel ( $\sigma_{py}$ ) gerilmeler, transdüserle bağlanan ağırlığın bir fonksiyonu olarak Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.6: Zil tipi transdüserin kapaklarını temsil eden Belleville yayı gösterimi



Şekil 6.7: Eklenen ağırlığın fonksiyonu olarak  $p$  noktasında oluşan dairesel ( $\sigma_{px}$ ) ve eksenel ( $\sigma_{py}$ ) gerilmeler

## 6.2 Deneysel Çalışma

Kim ve ark. tarafından çalışmalarda kullanılan deneysel düzenekte [20, 60, 78], zil tipi transdüserler mekanik olarak yük taşıyan elemanlar olarak yerleştirilmişlerdir. Oysa mühendislik yapılarının içerisinde yapısal sağlık kontrolü amacıyla yerleştirilecek kablosuz algılayıcı ağlarına güç sağlamak amacıyla kullanılacak olan enerji hasatı ünitelerinin yük taşıyıcı olması uygulamada mümkün gözükmemektedir.

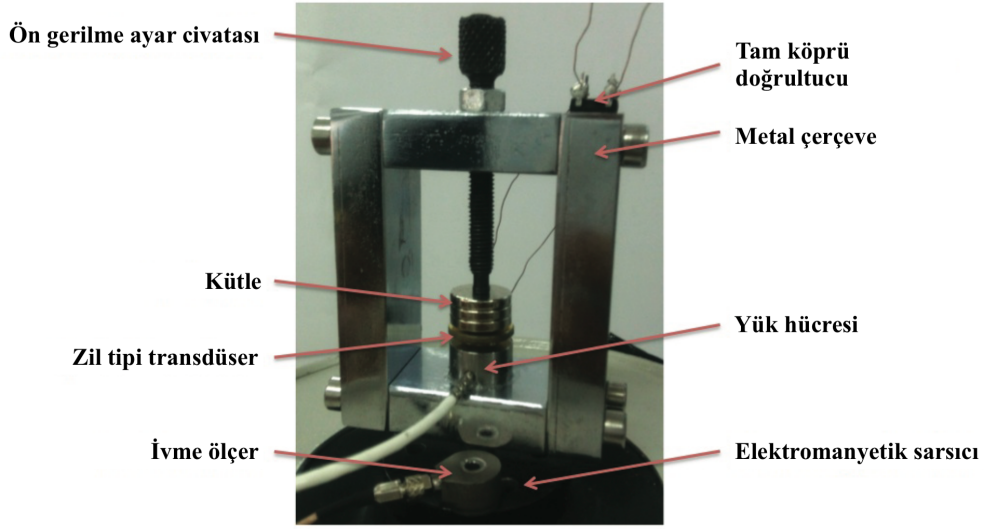
Bu çalışmada kullanılan düzenek, zil tipi transdüserler ve üstlerine eklenen ağırlıkla beraber bir çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 6.8). Bu düzenek bir sıkıştırılmalı tip ivme ölçer ile aynı prensipte çalışmaktadır (Şekil 6.9).

Deneysel süreçte etkisi araştırılan parametreler şunlardır:

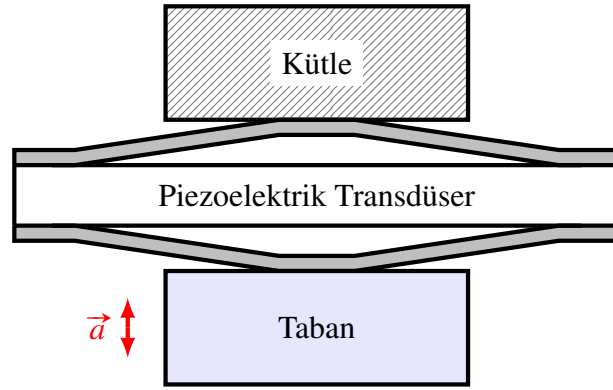
1. Elektroaktif malzeme
2. Mekanik ön-gerilme
3. Ağırlık
4. Elektriksel yük
5. Frekans

Transdüserlere mekanik ön gerilme (statik yük) bir ayar civatası ile uygulanmakta ve Burster Praezisionsmesstechnik GMBH & Co, model 8416 ultra-minyatür yük hücresi ile ölçülmektedir. Ön gerilme 3 kademe uygulanmaktadır; 0 N, 5 N ve 10 N. Transdüserlere eklenen ağırlıklar 12.7 mm çapında ve 2 mm kalınlığında manyetik disklerdir. Bu disklerden her biri 1.8 g ağırlığındadır. Deneysel çalışmalarda bu disklerden her defasında 1 adet eklenmek suretiyle 1.8 g ile 9 g arasında ağırlıklar kullanılmıştır.

Transdüserin bağlı olduğu çerçeve bir LDS V-406 (Brüel & Kjør Sound & Vibration Measurement A/S, Danimarka) model sarsıcının armatürüne bağlanmış ve değişen frekans aralıklarında sinüs sinyalleri ile sarsılmıştır. Sinyal üretici olarak Agilent Technologies DSO-X 3014A tipi osiloskopun entegre sinyal üreticisi



**Şekil 6.8:** Çelik çerçeve içerisine yerleştirilmiş zil tipi transdüser ile hazırlanmış deney düzeneği

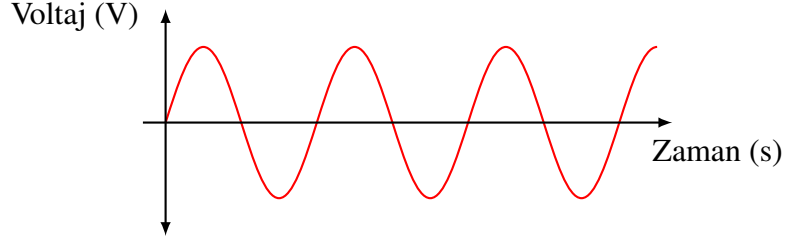


**Şekil 6.9:** Sıkıştırılmalı tip ivme ölçerin gösterimi

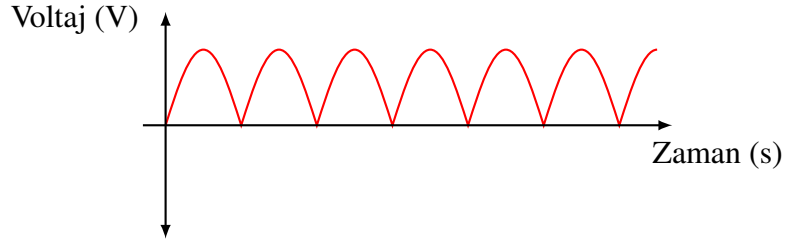
kullanılmıştır. Sarsıcının oluşturduğu titreşimin ivmesi, Measurement Specialties Inc. Model 7101A-0050 tipi ivme ölçer ile ölçülmüştür. Kullanılan ivmeölçer düşük empedanslı (voltaj) çıkış verdiği için dolayı ivmeölçerin entegre devresine güç vermek amacıyla bir DeltaTron™ güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağının çıkışı da ivmeyi ölçmek amacıyla bir osiloskopa bağlanmıştır. Titreşim sürekli olarak 2 g olacak şekilde uygulanmıştır. Bu titreşim seviyesi gündelik hayatta karşılaştığımız titreşimlere karşılık gelmektedir (Tablo 1.7).

Transdüserin bağlı olduğu sarsıcıya uygulanan sinüs fonksiyonu şeklindeki titreşim sinyali ile transdüserin çıkışından ölçülen voltaj Şekil 6.10(a)'da görüldüğü gibi

olacaktır. Ancak elde edilen enerji ile bir elektronik cihaza güç sağlamak istediğimizde DC çıkış elde etmek gerekli olmaktadır. Bundan dolayı bir tam köprü doğrultucu Şekil 6.11 kullanılarak voltaj doğrultulmalı ve bir filtre kapasitör yardımıyla da DC voltaj çıkışı elde edilmelidir.



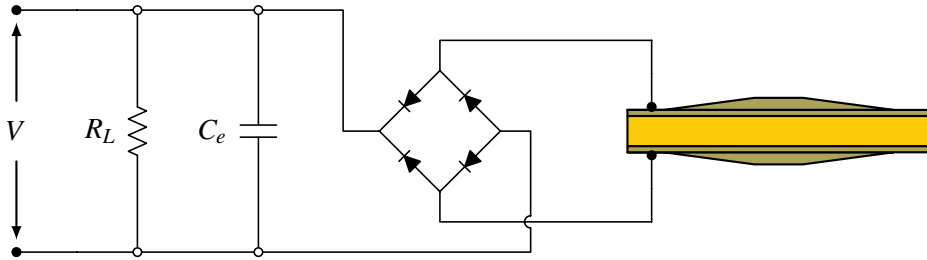
(a)



(b)

**Şekil 6.10:** Sinüs fonksiyonu şeklinde titretilen bir zil tipi transdüserin çıkışında ölçülen (a) açık devre ve (b)doğrultulmuş voltaj

Deneysel çalışmalarda kullanılan elektronik devre Şekil 6.11 'de verilmiştir.



**Şekil 6.11:** Deneysel çalışmalarda kullanılan elektronik devre

Yapılan deneysel çalışma için zil tipi transdüserlerin bağlandığı metal çerçevenin (Şekil 6.8) titreşim karakteristiği de oldukça önemlidir. Metal çerçevede oluşan elastik deformasyon özellikle yüksek frekanstaki titreşimlerde önem kazanmaktadır. Çerçevenin titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te verilmiştir.



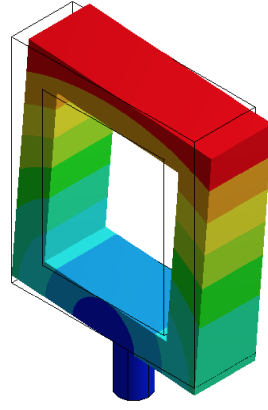
Şekil 6.12: Zil tipi transdüserlerin performans değerlendirilmesinde kullanılan deney düzenneği

Çerçeve ile elektromanyetik sarsıcı arasındaki bağlantı da titreşim karakteristiğini ve ölçüm hassasiyetini etkilemektedir. Bağlantının titreşim karakteristiği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla aradaki bağlantı elemanı silindirik bir çubuk olarak modellenmiştir. Çubuğun çapı 10 mm (Şekil 6.13) ve 5 mm (Şekil 6.14) olarak değiştirilerek çerçevenin titreşim karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir.

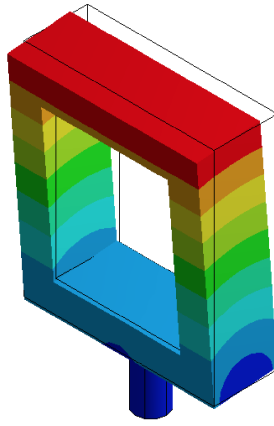
Çapı 10 mm olan çubuk ile bağlanmış çerçevenin titreşim modları Şekil 6.13'te verilmiştir. Birinci titreşim modu düzlem içi bir titreşim modudur. İkinci titreşim modu ise düzlem dışı bir titreşim modu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu modların her ikisi de transdüserin aksel yönelimini değiştirmekte ve istenmeyen yanıl hareketler oluşturmaktadır. Her iki titreşim modu yalnızca 50 Hz ile birbirini takip etmektedir. Birinci titreşim modu 676 HZ'te, ikinci titreşim modu ise 726 Hz'te görülmektedir. Üçüncü mod ise oldukça yüksek bir frekansta karşımıza çıkmaktadır (3214 Hz) ve bu modda bir burulma hareketi söz konusudur. Bu hareket transdüserin aksel yönelimini etkilemediğinden dolayı daha güvenilir bir ölçüm almaya olanak tanımaktadır.

5 mm çapındaki çubuk ike sarsıcıya bağlanmış çerçevenin ilk üç titreşim modu Şekil 6.14'te görülmektedir. Bu üç titreşim modu da daha önceki çerçeve modeli ile benzerlik göstermektedir. Ancak 10 mm çaplı çubuk ile bağlantısı yapılmış olan model ile bağlantısı 5 mm çaplı çubuk yardımıyla yapılmış model arasındaki en önemli fark ilk iki titreşim modunda (Şekil 6.14(a) - 6.14(b)) açıkça ortaya çıkmaktadır. 5 mm çaplı çubukla bağlanmış çerçevenin birinci rezonans frekansı 185 Hz ve ikinci titreşim modunun frekansı da 205 Hz'tir. Bu frekanslar bir önceki çerçeve modelinin rezonans frekanslarından oldukça düşüktür. İki titreşim modu sadece 30 Hz'lik frekans aralığıyla birbirinden ayrılmaktadır. Üçüncü titreşim modunun rezonans frekansı ise 3211 Hz'te görülmektedir ki bu da önceki modelin 3214 Hz olan üçüncü rezonans frekansına oldukça yakındır.

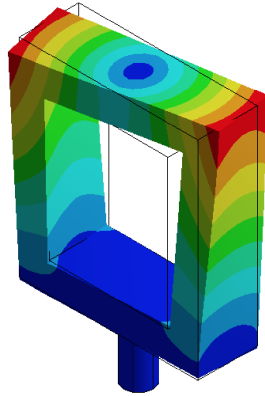
Yapılan analiz göstermektedir ki elektromanyetik sarsıcı ile metal çerçeve arasındaki bağlantı elemanının çapı, yüksek frekanslarda etkin olan bir değişken değildir.



(a)

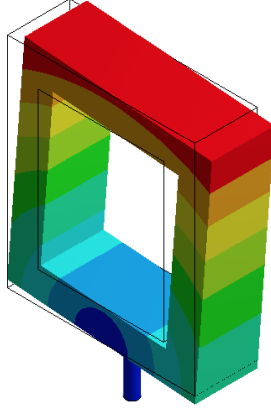


(b)

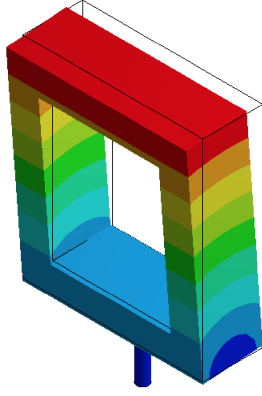


(c)

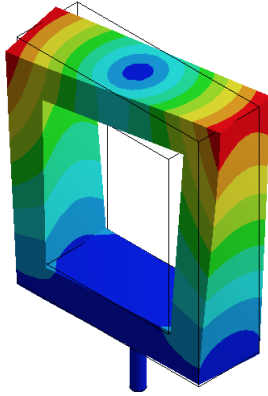
**Şekil 6.13:** 10 mm çapındaki silindirik bağlantı elemanı ile sarsıcıya bağlanmış olan çerçevenin (a) birinci (676 Hz), (b) ikinci (726 Hz) ve (c) üçüncü (3214 Hz) titreşim modları



(a)



(b)



(c)

**Şekil 6.14:** 5 mm çapındaki silindirik bağlantı elemanı ile sarsıcıya bağlanmış olan çerçevenin (a) birinci (185 Hz), (b) ikinci (205 Hz) ve (c) üçüncü (3211 Hz) titreşim modları

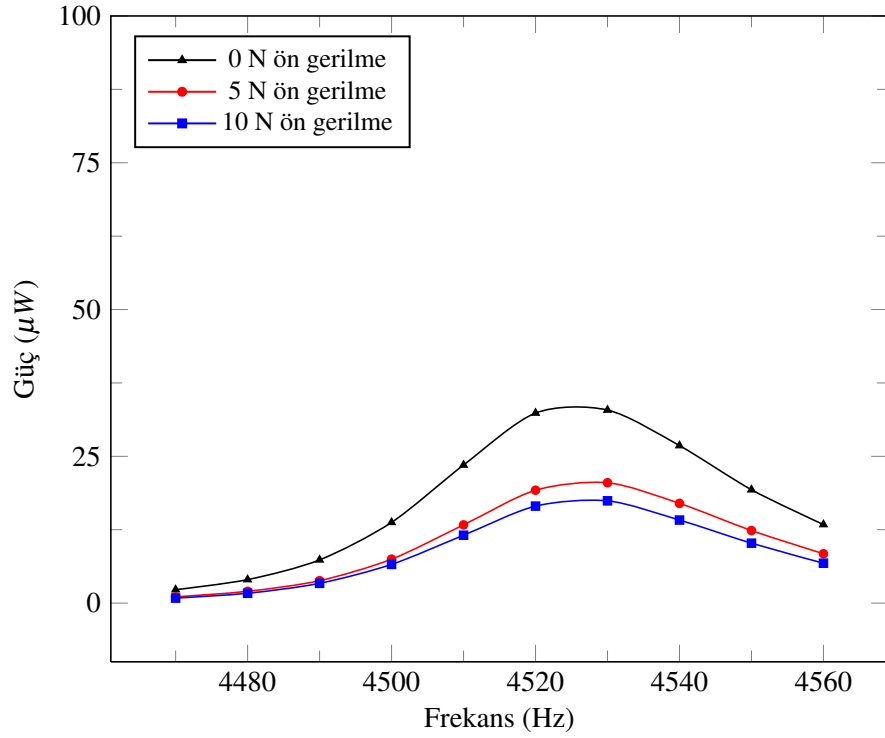
### 6.3 Sonuçlar

Önceden de belirtildiği gibi deneysel süreçte etkisi araştırılan parametreler; 1) elektro-aktif malzeme, 2) mekanik ön gerilme, 3) ağırlık, 4) elektriksek yük ve 5) frekanstır. Sonuçlar 6 farklı grafik ile sunulmaktadır. Bunlar:

1. Elde edilen güç, frekans ve mekanik ön gerilmenin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Her bir ağırlık için grafikler ayrı şekilde gösterilmektedir. Bu grafikler rezonans davranışını ve bant genişliğini belirgin şekilde ifade etmek amacıyla kullanılmıştır.
2. Elde edilen güç, elektriksel yük ve mekanik ön gerilmenin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Elektriksel direnç arttırılarak EH sisteminin elektriksel empedans uyumu da gözlemlenmiştir. Her bir ağırlık için grafikler ayrı şekilde gösterilmektedir. Bu grafikler elektriksel empedans uyumunu belirgin şekilde ifade etmek amacıyla kullanılmıştır.
3. Her bir ağırlık için elde edilen maksimum güç, frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Kullanılan ağırlığın rezonans frekansına etkisi bu grafikler yardımıyla görölmektedir.
4. Her bir ağırlık için elde edilen maksimum güç, elektriksel yükün bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Kullanılan ağırlığın empedans uyumu karakteristiğine etkisi bu grafikler yardımıyla görölmektedir.
5. Maksimum gücün elde edildiği koşullar için elektriksel yük üzerinden ölçölen voltaj verilmektedir.
6. Maksimum gücün elde edildiği koşullar için elektriksel yük üzerinden ölçölen akım verilmektedir.

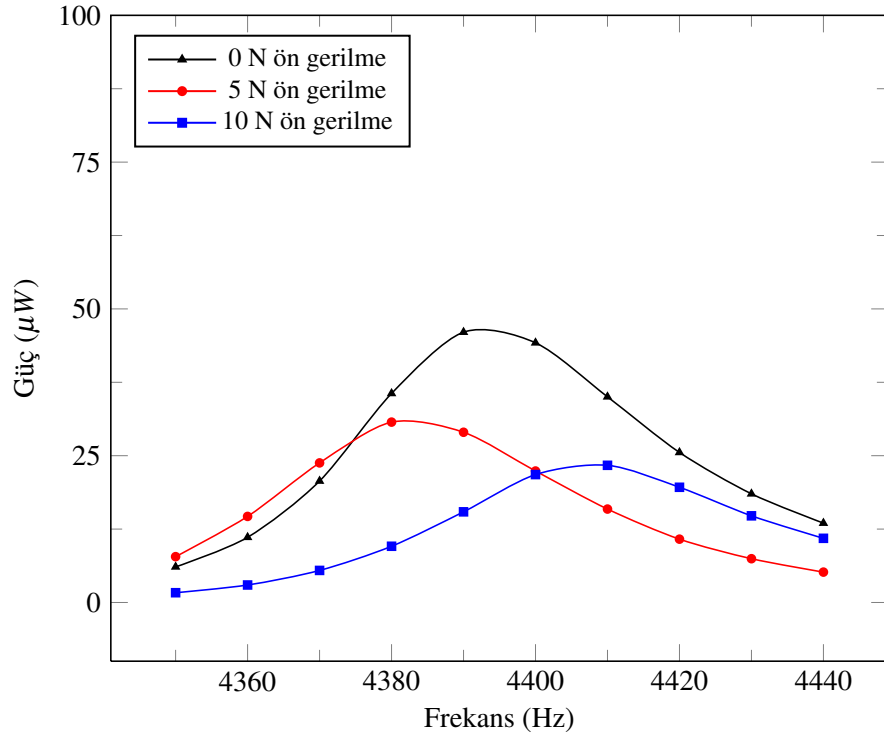
### 6.3.1 C-PZT1 Transdüserin Enerji Hasatı Karakteristikleri

Kullanılan farklı ağırlıklar için transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi Şekil 6.15’de verilmektedir. Frekans arttıkça üretilen güç artmakta ve rezonans frekansına ulaşıldığında elde edilen güç de maksimum olmaktadır. Rezonans frekansı kullanılan ağırlığa göre değişmekle birlikte elde edilen enerji her zaman 0 N ön gerilmede gözlemlenmektedir. Kullanılan ağırlık arttırıldıkça rezonans frekansı azalmaktadır.

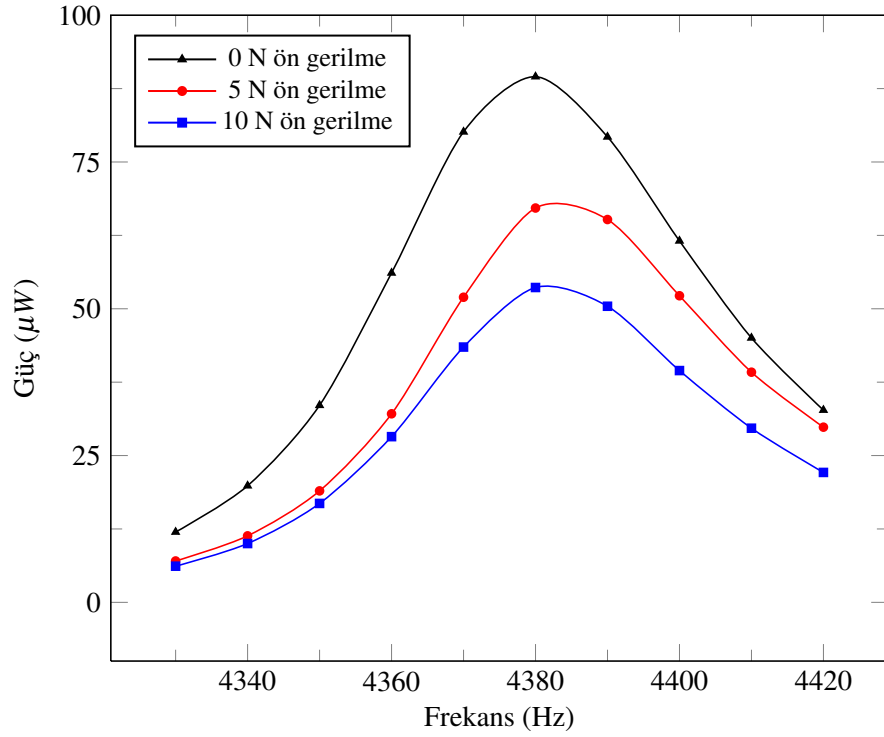


(a)

**Şekil 6.15:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi

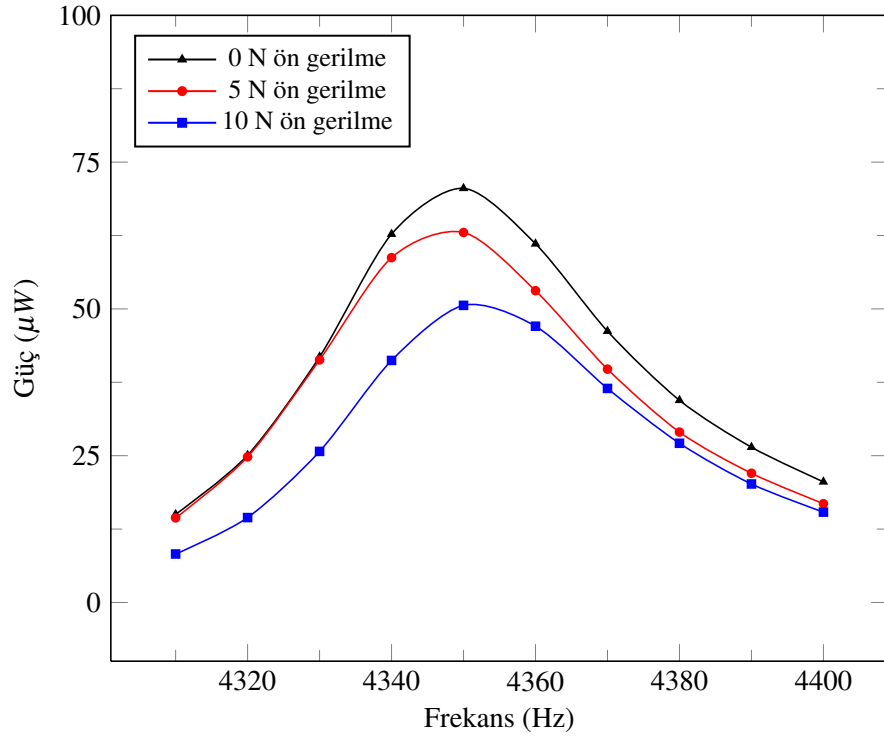


(b)

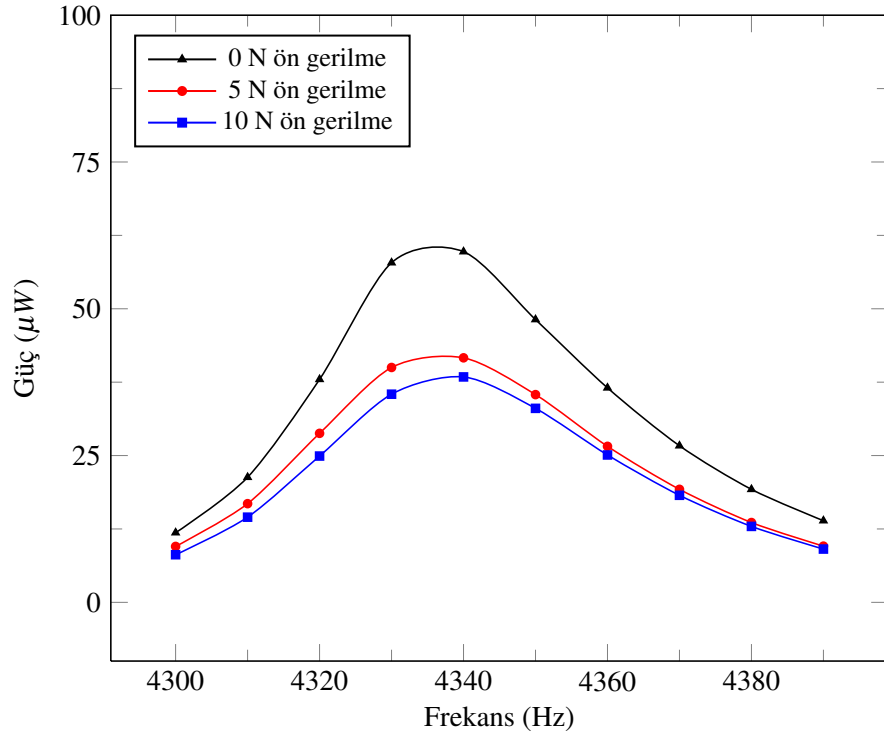


(c)

**Şekil 6.15:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)



(d)

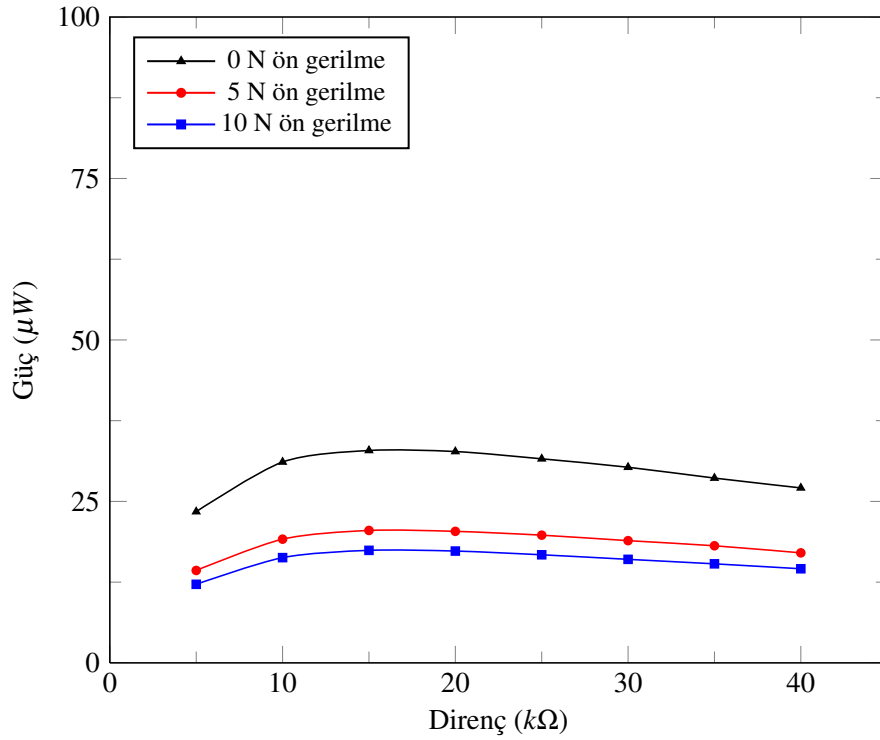


(e)

**Şekil 6.15:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)

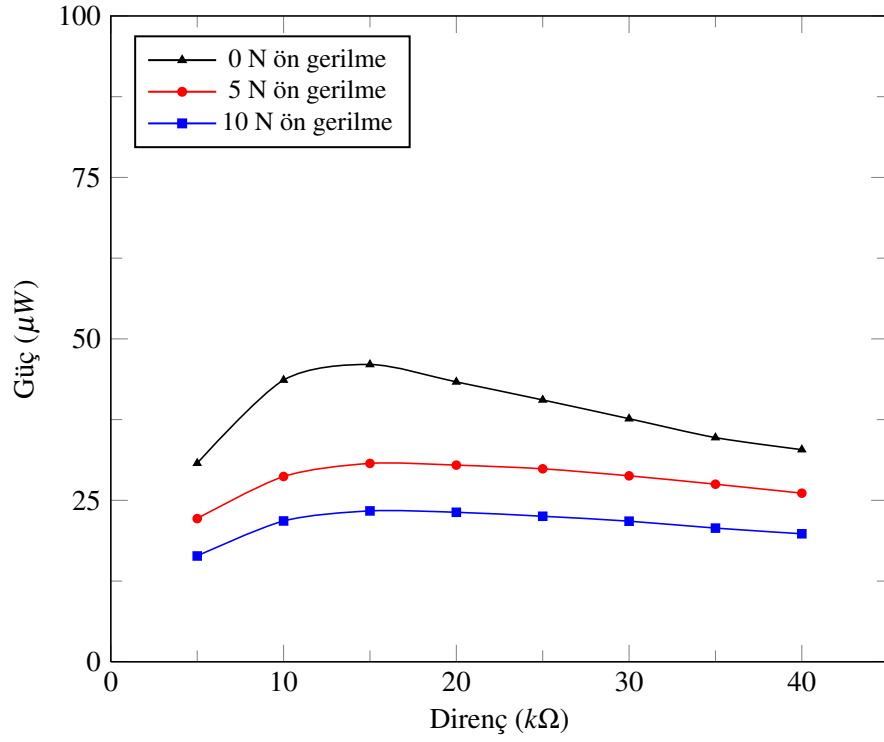
Kullanılan farklı ağırlıklar için transdüserin ürettiği gücün elektriksel yük ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi Şekil 6.16'de verilmektedir. Elektriksel yükün artmasıyla birlikte üretilen güç artmakta ve empedans uyumunun gerçekleştiği noktada güç maksimum olmaktadır. Sistemin elektriksel empedansı mekanik ön gerilme ve kullanılan ağırlıkla değişim göstermemektedir.

Her bir ağırlık için elde edilen en yüksek güç frekans (Şekil 6.17) ve elektriksel yüke (Şekil 6.18) bağlı olarak verilmiştir. Kullanılan ağırlığa bağlı olarak rezonans frekansındaki artış Şekil 6.17'de görülmektedir. 4330 Hz frekansta ve 15 k $\Omega$ 'luk elektriksel yük üzerinde 89.52  $\mu$ W'lık bir güç elde edilmiştir.

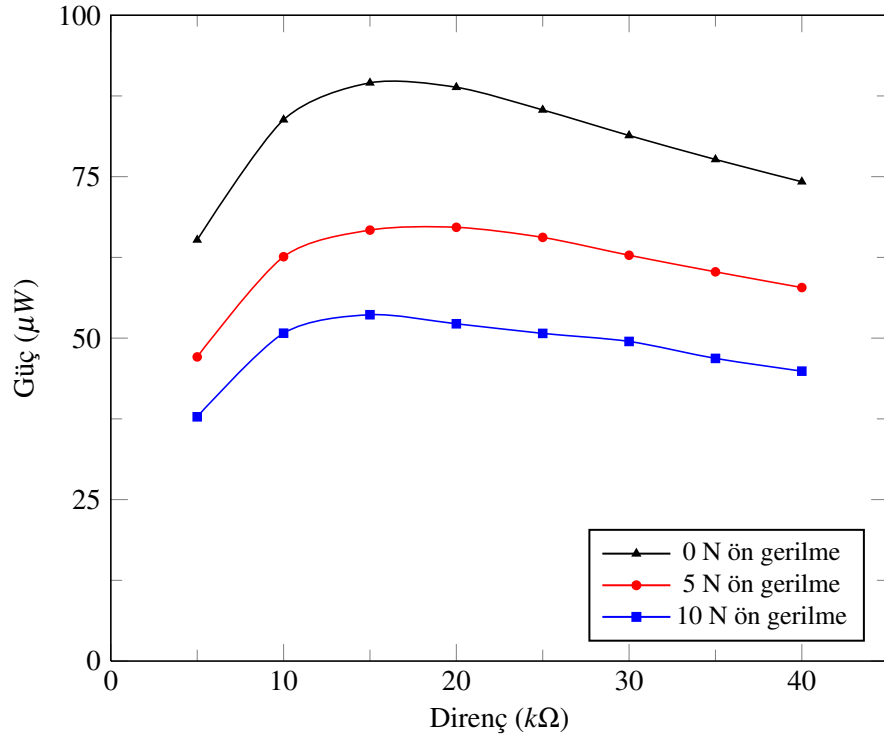


(a)

**Şekil 6.16:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi

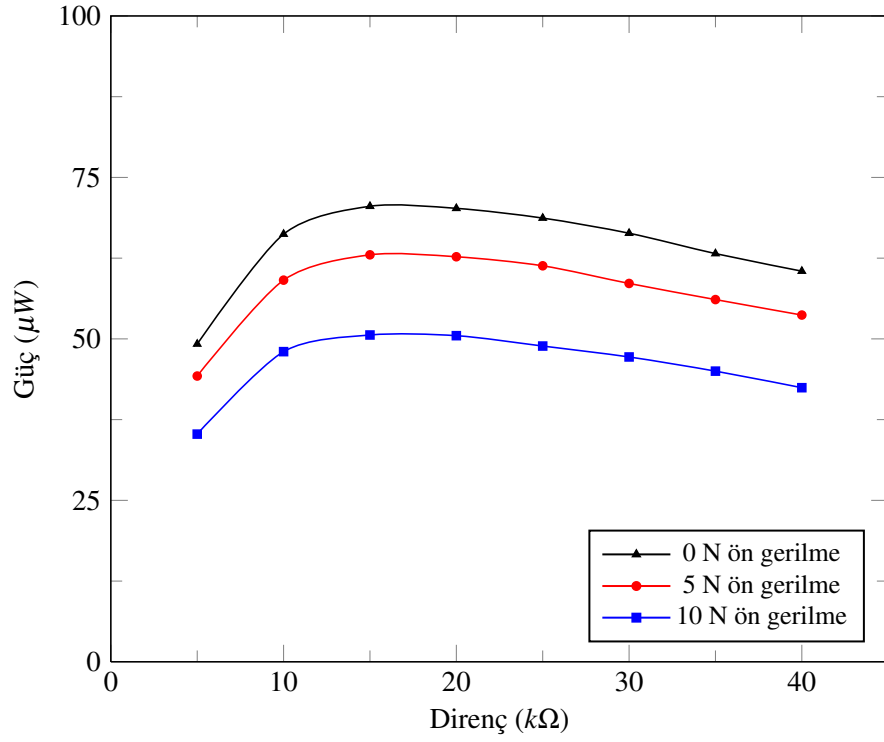


(b)

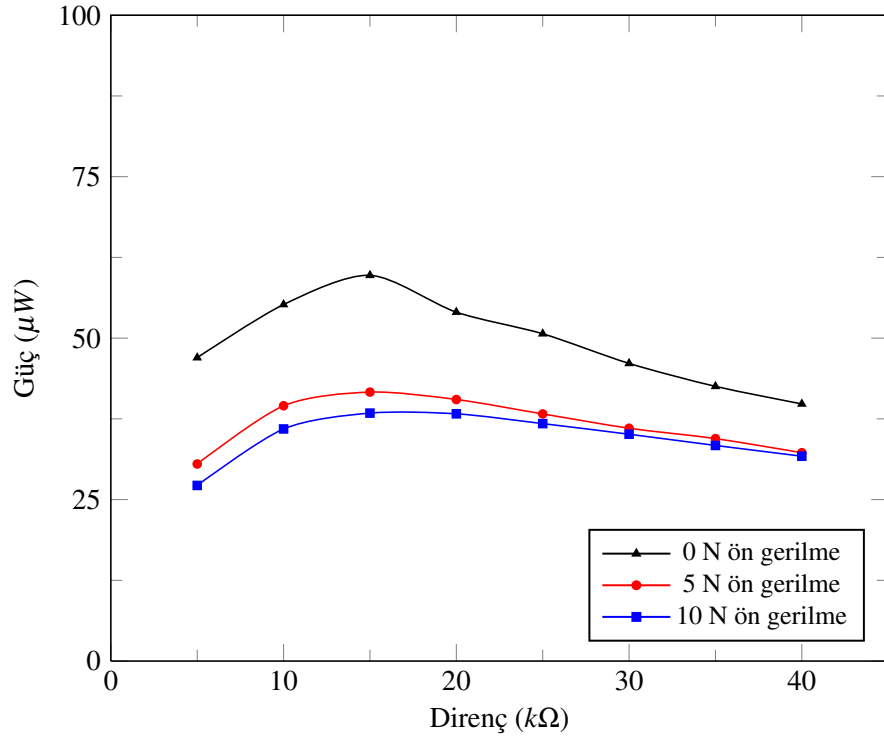


(c)

**Şekil 6.16:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)



(d)

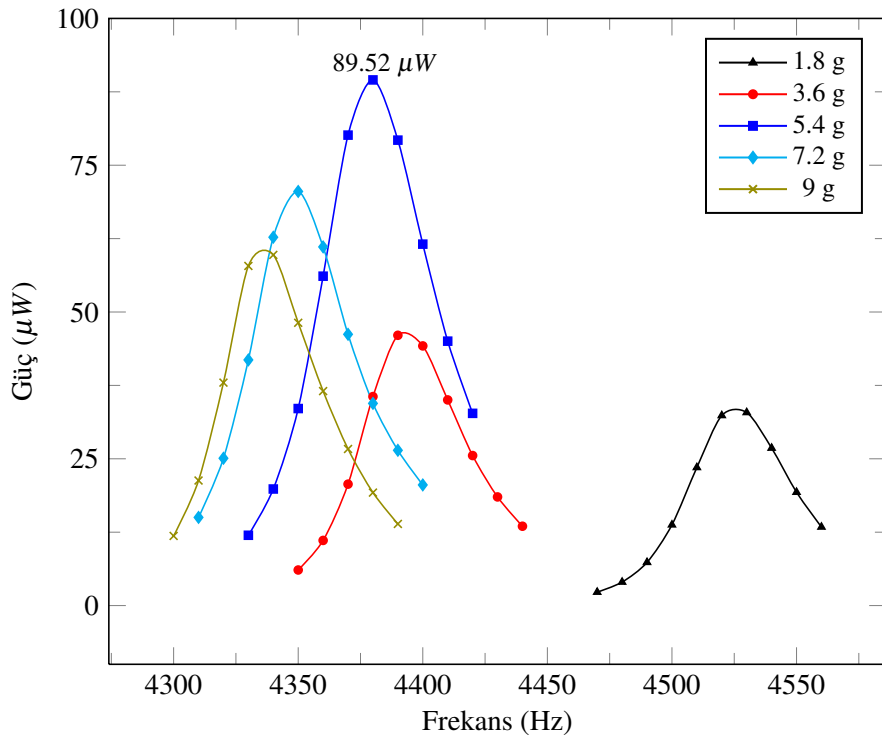


(e)

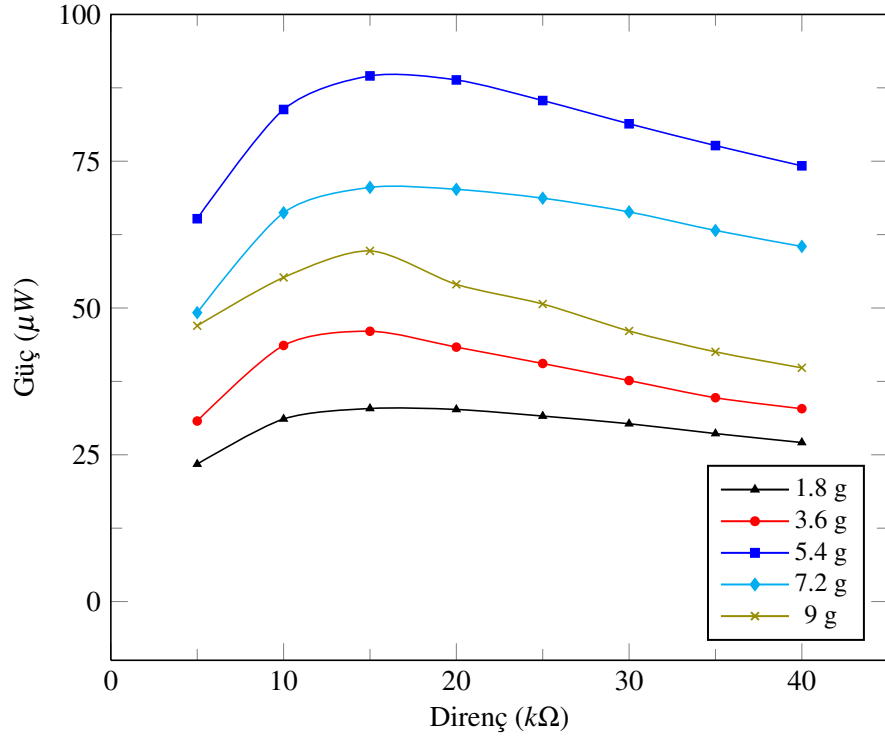
**Şekil 6.16:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)

Şekil 6.19’de C-PZT1 transdüserinin en yüksek güç ürettiği koşullarda (5.4 g ağırlık ile ve 15 k $\Omega$  elektriksel yük üzerinden ölçüm yapılarak) voltaj karakteristikleri değişen mekanik ön gerilme altında verilmiştir. Buna göre 0 N ön gerilme altında ve 4330 Hz frekansta 1150 mV’luk voltaj ölçülmüştür. Ön gerilme arttıkça voltajın düştüğü gözlemlenmektedir. 10 N’luk ön gerilme altında 890 mV voltaj ölçülmüştür.

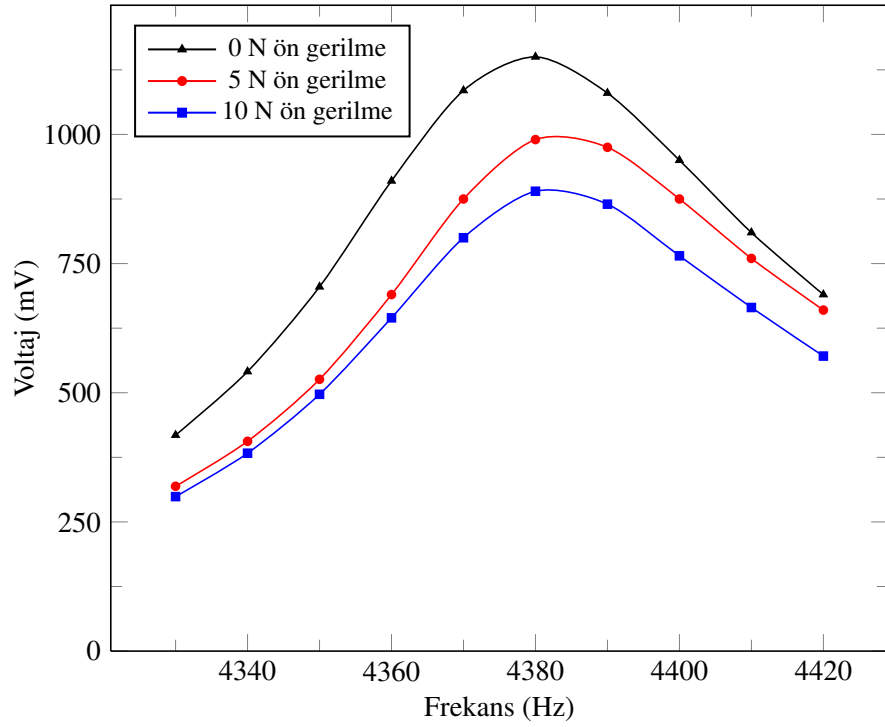
Aynı şekilde Şekil 6.20’de C-PZT1 transdüserinin en yüksek güç ürettiği koşullarda (5.4 g ağırlık ile ve 15 k $\Omega$  elektriksel yük üzerinden ölçüm yapılarak) akım karakteristikleri değişen mekanik ön gerilme altında verilmiştir. Buna göre 0 N ön gerilme altında ve 4330 Hz frekansta 120.5  $\mu$ A’lik voltaj ölçülmüştür. Ön gerilme arttıkça akımın da düştüğü gözlemlenmektedir. 10 N’luk ön gerilme altında 77.8  $\mu$ A voltaj ölçülmüştür.



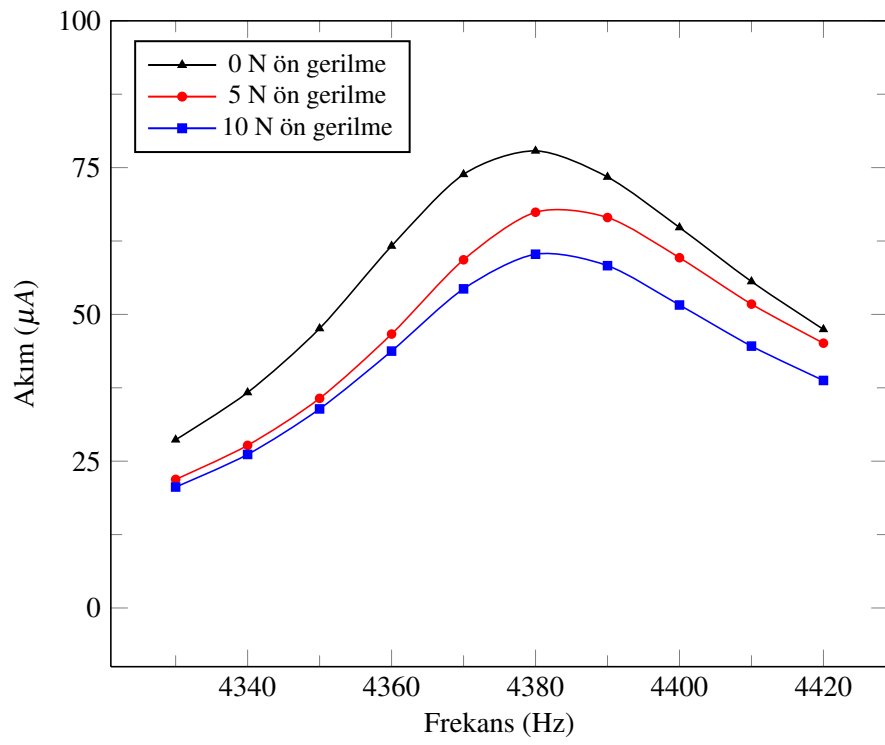
**Şekil 6.17:** C-PZT1 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün frekansa bağlı değişimi



**Şekil 6.18:** C-PZT1 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün elektriksel yüke bağlı değişimi



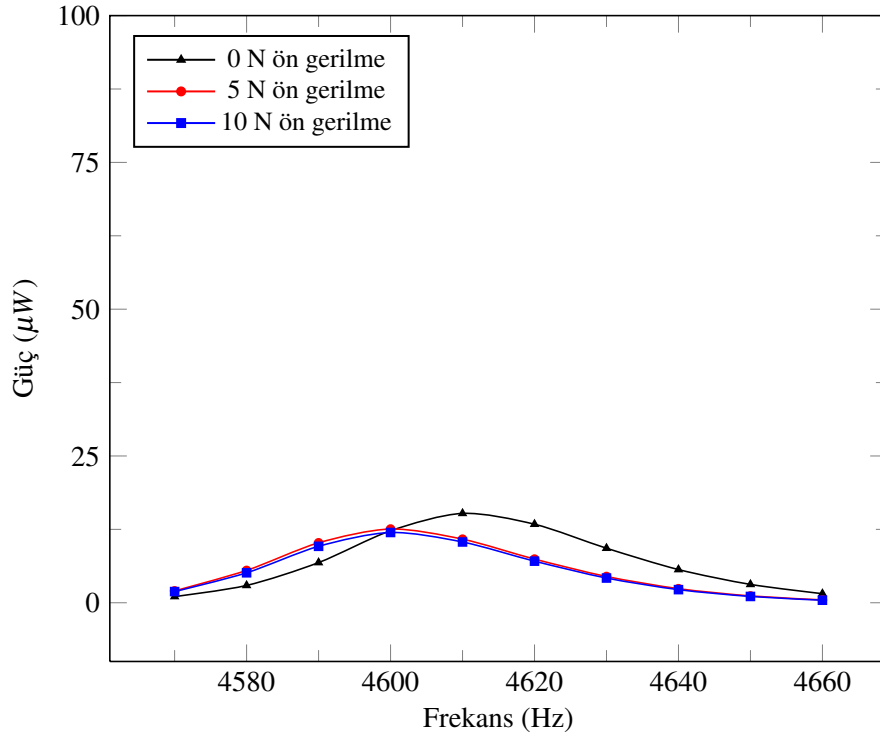
**Şekil 6.19:** C-PZT1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen voltaj



**Şekil 6.20:** C-PZT1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen akım

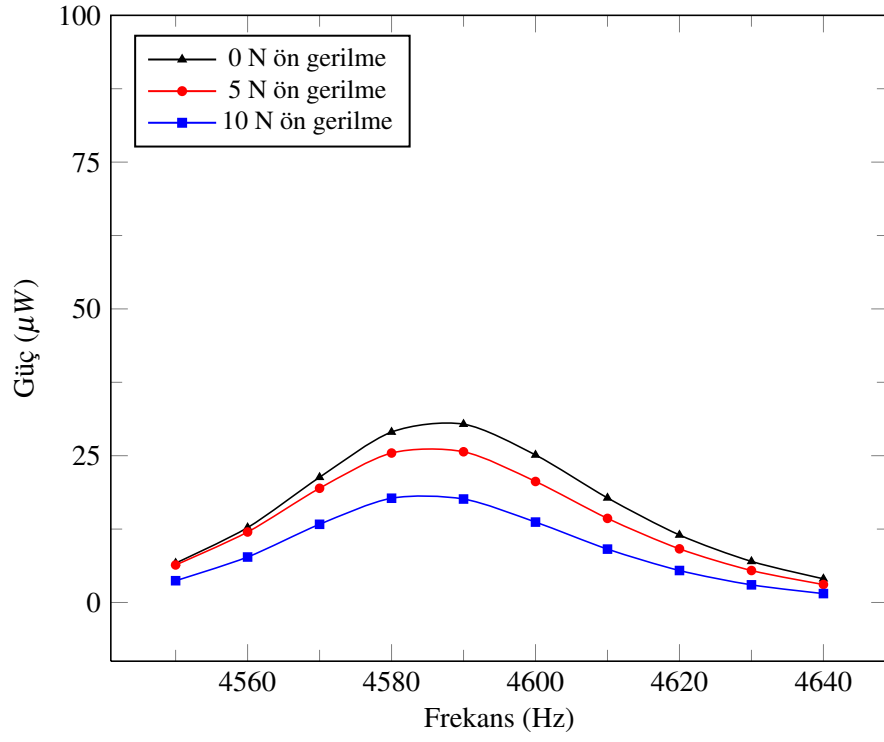
### 6.3.2 C-PZT2 Transdüserin Enerji Hasatı Karakteristikleri

Kullanılan farklı ağırlıklar için transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi Şekil 6.21’te verilmektedir. Frekans arttıkça üretilen güç artmakta ve rezonans frekansına ulaşıldığında elde edilen güç de maksimum olmaktadır. Rezonans frekansı kullanılan ağırlığa ve uygulanan mekanik ön gerilmeye bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan ağırlık arttıkça rezonans frekansında düşme gözlemlenmektedir ancak mekanik ön gerilme ile rezonans frekansları arasında öngörülebilir bir değişim söz konusu değildir. Artan mekanik ön gerilme ile birlikte 1.8 g ve 9 g ağırlık kullanılan transdüserler için rezonans frekansları azalırken 5.4 g ve 7.2 g’lık ağırlık kullanılan transdüserler için rezonans frekansları artmaktadır.

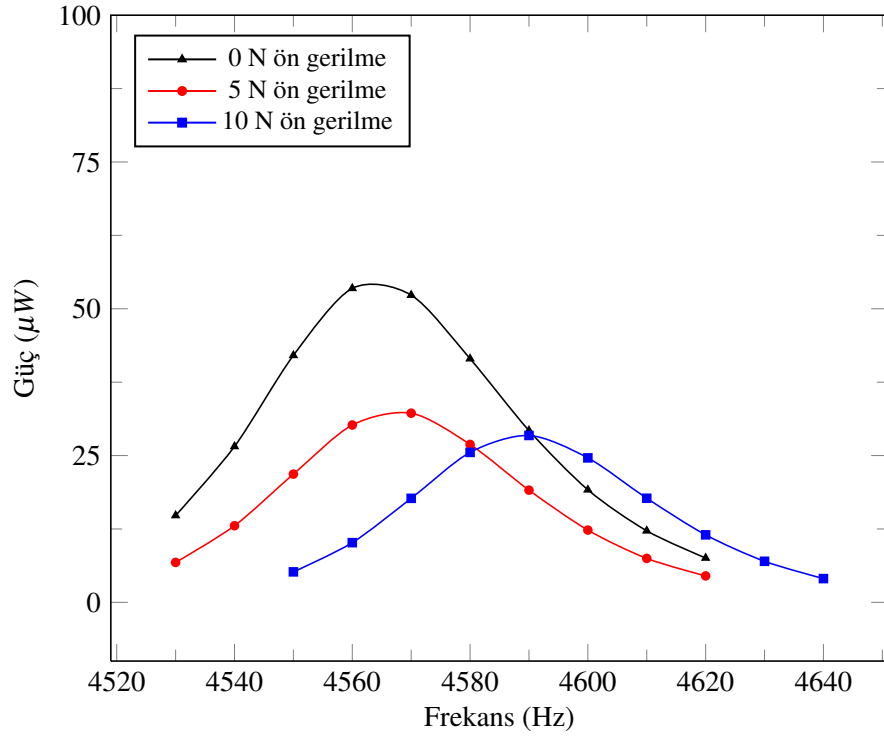


(a)

**Şekil 6.21:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi

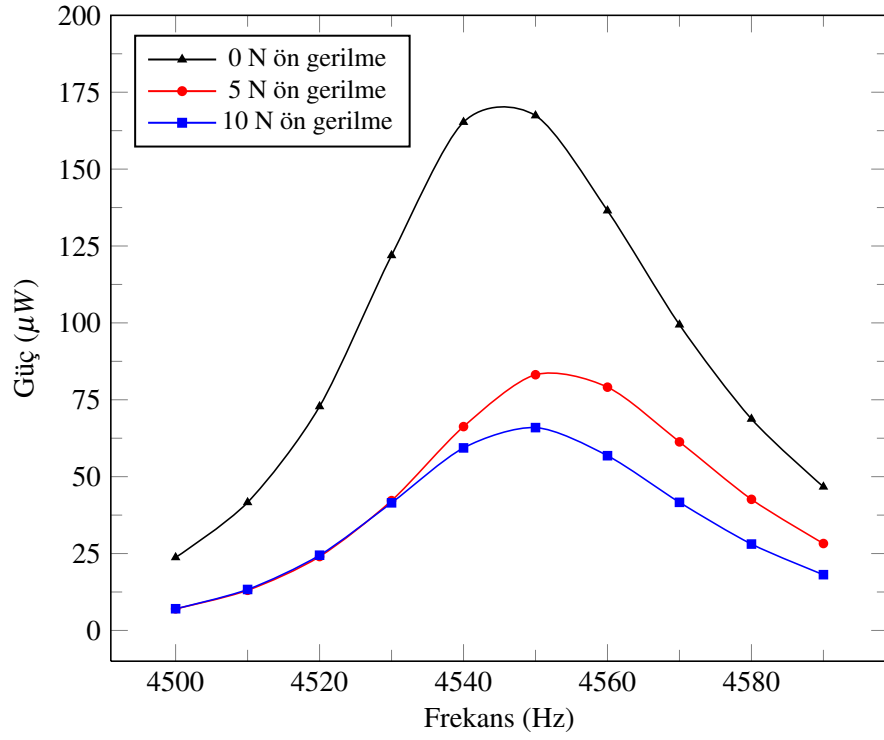


(b)

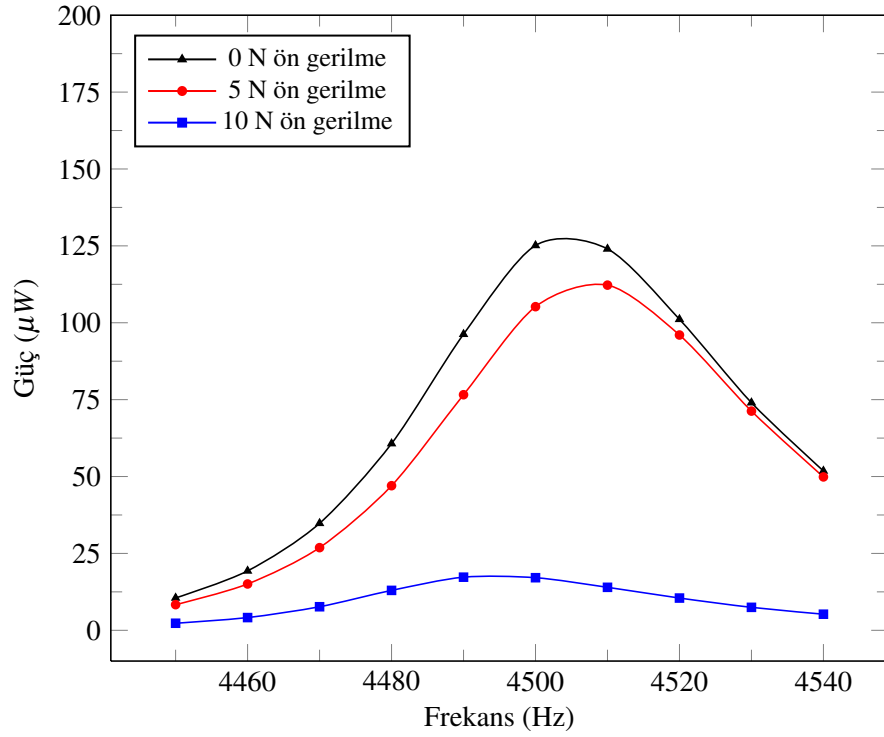


(c)

**Şekil 6.21:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)



(d)



(e)

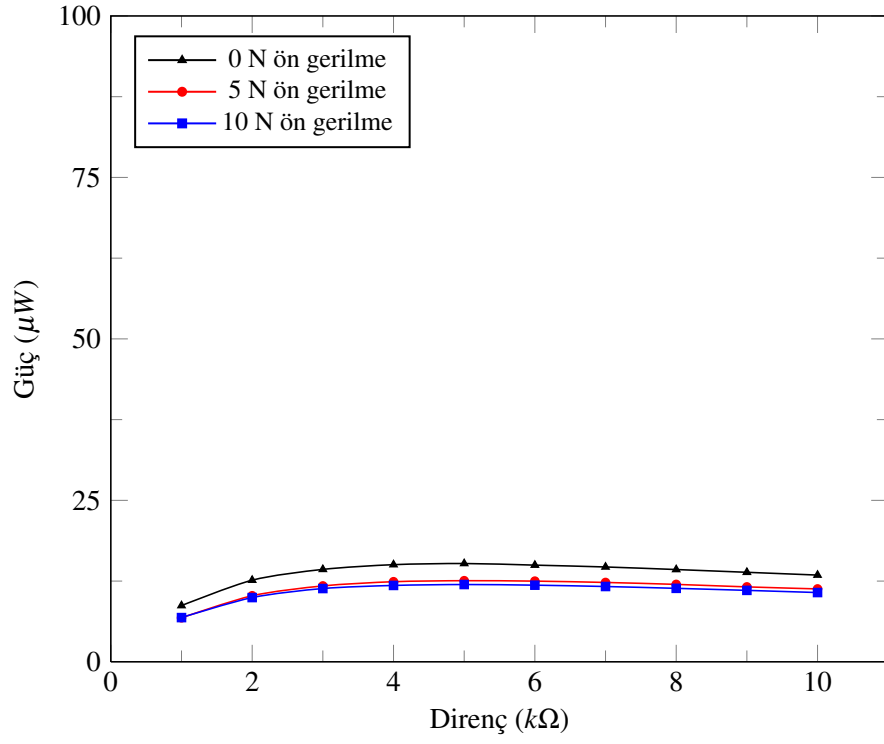
**Şekil 6.21:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)

Kullanılan farklı ağırlıklar için transdüserin ürettiği gücün elektriksel yük ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi Şekil 6.22’te verilmektedir. Elektriksel yükün artmasıyla birlikte üretilen güç artmakta ve empedans uyumunun gerçekleştiği noktada güç maksimum olmaktadır. Sistemin elektriksel empedansı mekanik ön gerilme ve kullanılan ağırlıkla değişim göstermemektedir.

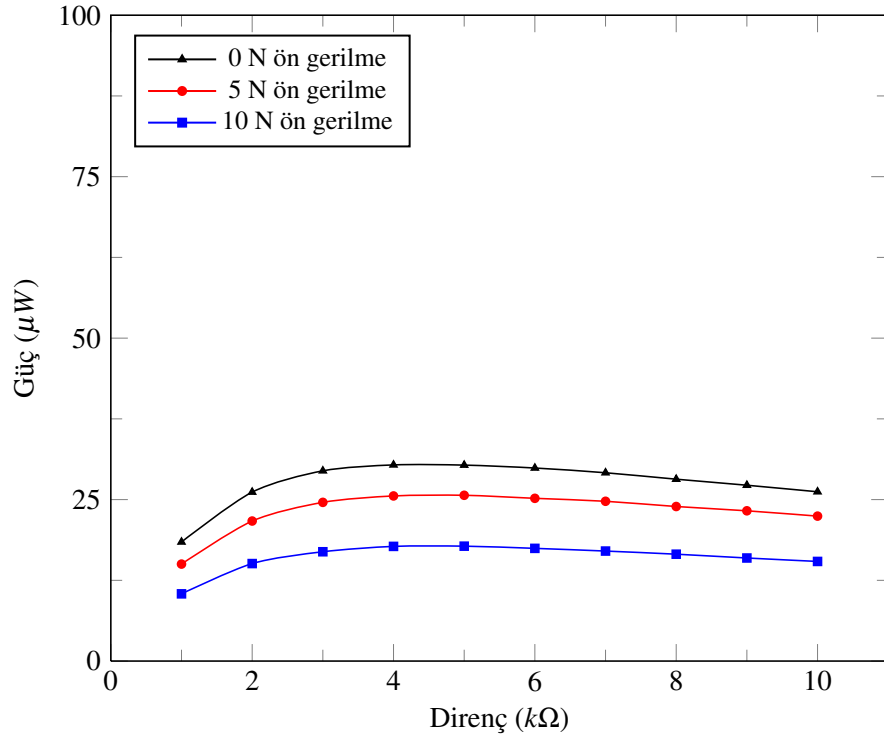
Her bir ağırlık için elde edilen en yüksek güç frekans (Şekil 6.23) ve elektriksel yüke (Şekil 6.24) bağlı olarak verilmiştir. Kullanılan ağırlığa bağlı olarak rezonans frekansındaki artış Şekil 6.23’da görülmektedir. 4550 Hz frekansta ve 4 k $\Omega$ ’luk elektriksel yük üzerinde 167.4  $\mu$ W’lık bir güç elde edilmiştir. C-PZT2 transdüserinin elektriksel empedansı C-PZT1’e göre daha düşüktür. Tabakalı yapının düşük elektriksel empedans sağladığı gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra C-PZT2 transdüserinin rezonans frekansı C-PZT1 transdüserine göre daha yüksektir.

Şekil 6.25’de C-PZT2 transdüserinin en yüksek güç ürettiği koşullarda (7.2 g ağırlık ile ve 4 k $\Omega$  elektriksel yük üzerinden ölçüm yapılarak) voltaj karakteristikleri değişen mekanik ön gerilme altında verilmiştir. Buna göre 0 N ön gerilme altında ve 4550 Hz frekansta 815 mV’luk voltaj ölçülmüştür. Ön gerilme arttıkça voltajın düştüğü gözlemlenmektedir. 10 N’luk ön gerilme altında 510 mV voltaj ölçülmüştür.

Aynı şekilde Şekil 6.26’de C-PZT2 transdüserinin en yüksek güç ürettiği koşullarda akım karakteristikleri, değişen mekanik ön gerilme altında verilmiştir. Buna göre 0 N ön gerilme altında ve 4550 Hz frekansta 205.4  $\mu$ A’lık akım ölçülmüştür. Ön gerilme arttıkça akımın da düştüğü gözlemlenmektedir. 10 N’luk ön gerilme altında ve 4600 Hz frekansta 129.1  $\mu$ A akım ölçülmüştür.

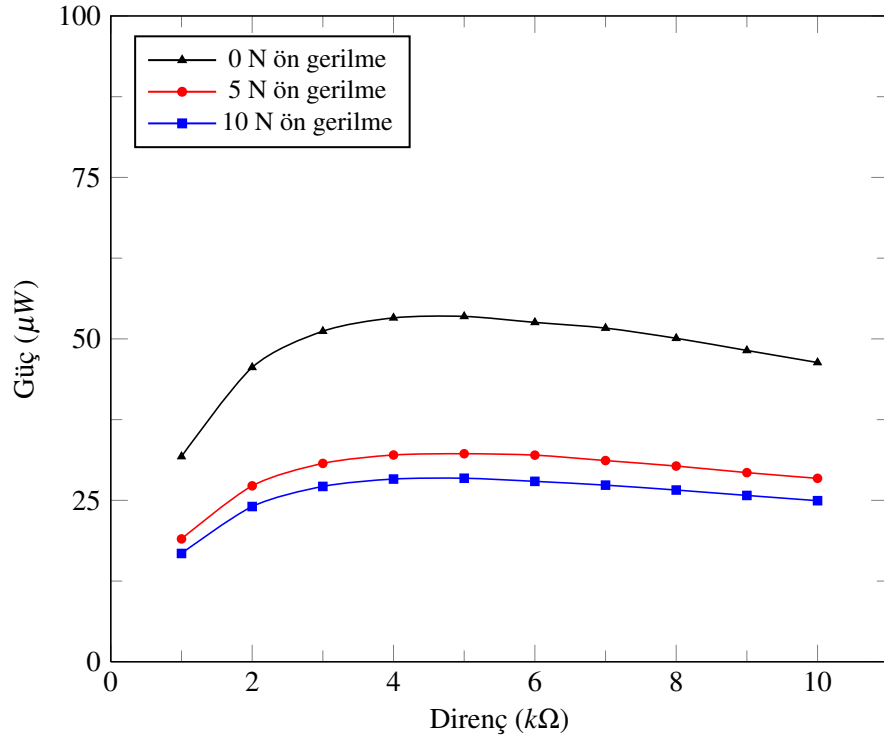


(a)

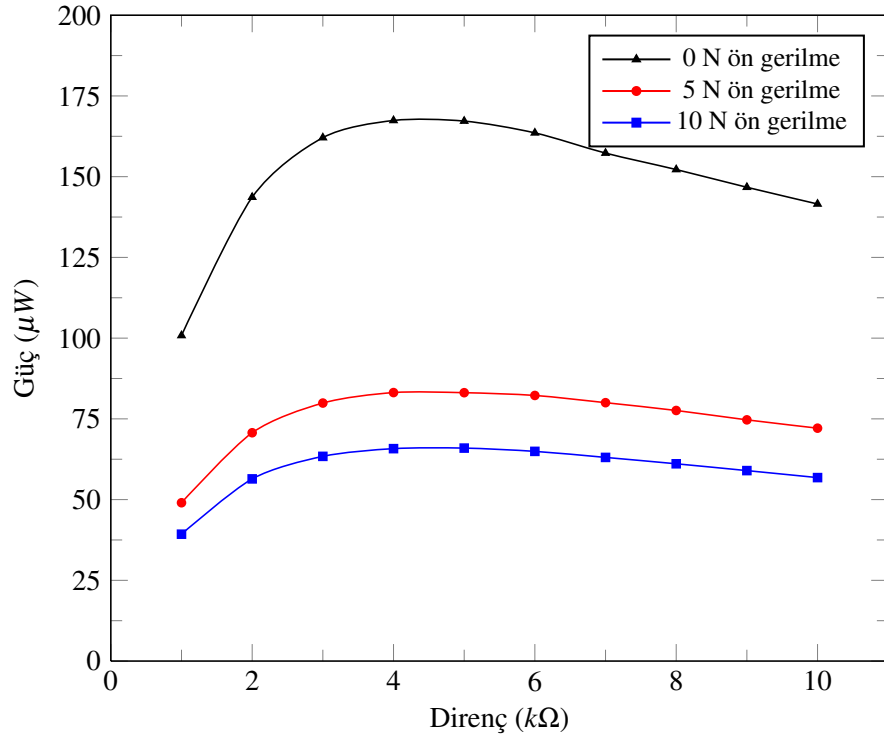


(b)

**Şekil 6.22:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi

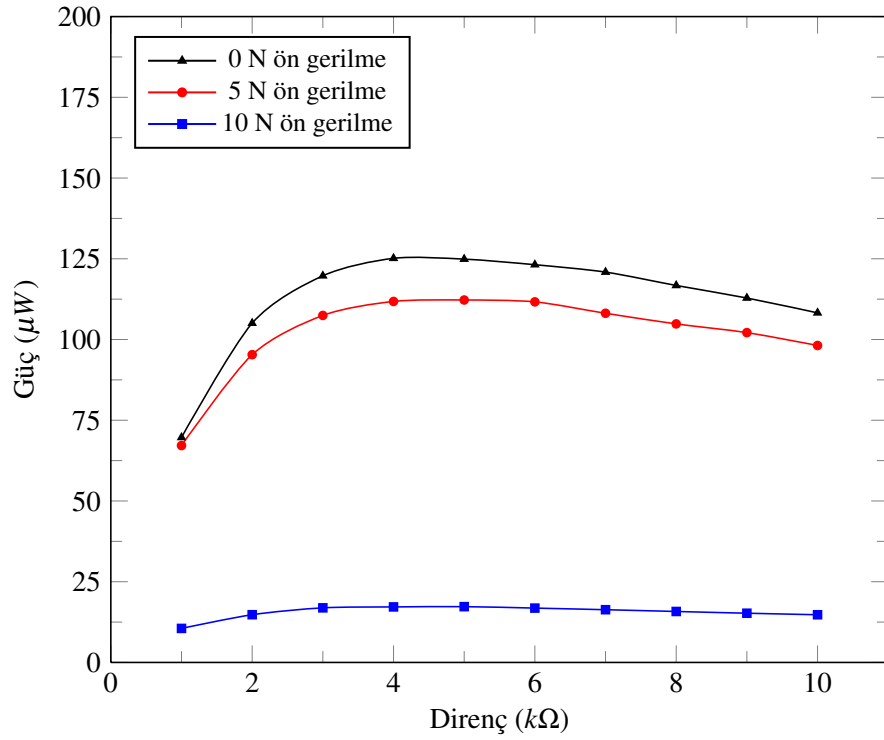


(c)



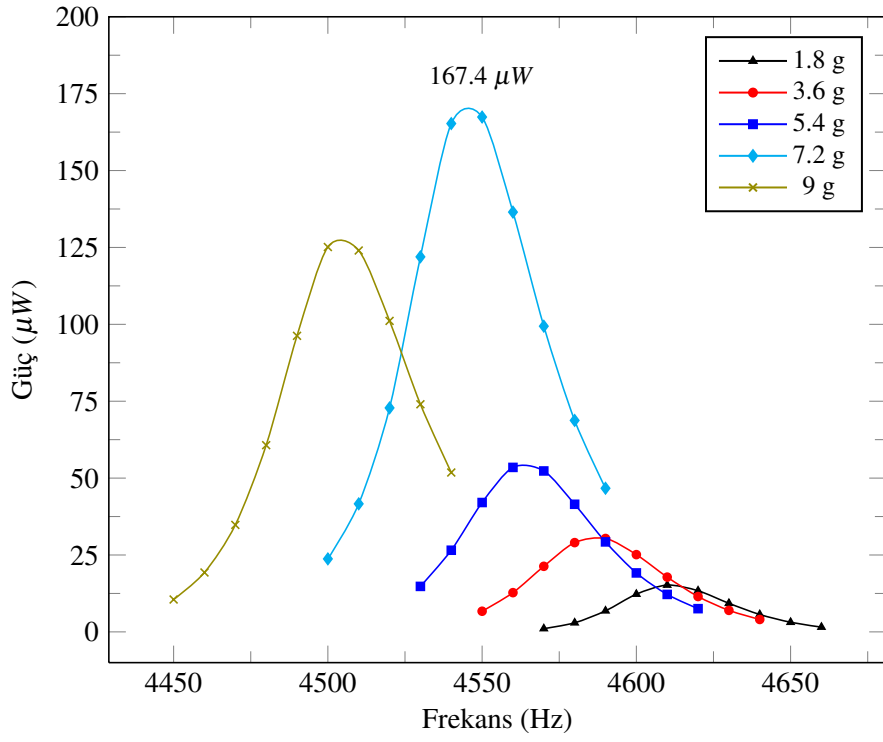
(d)

**Şekil 6.22:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)

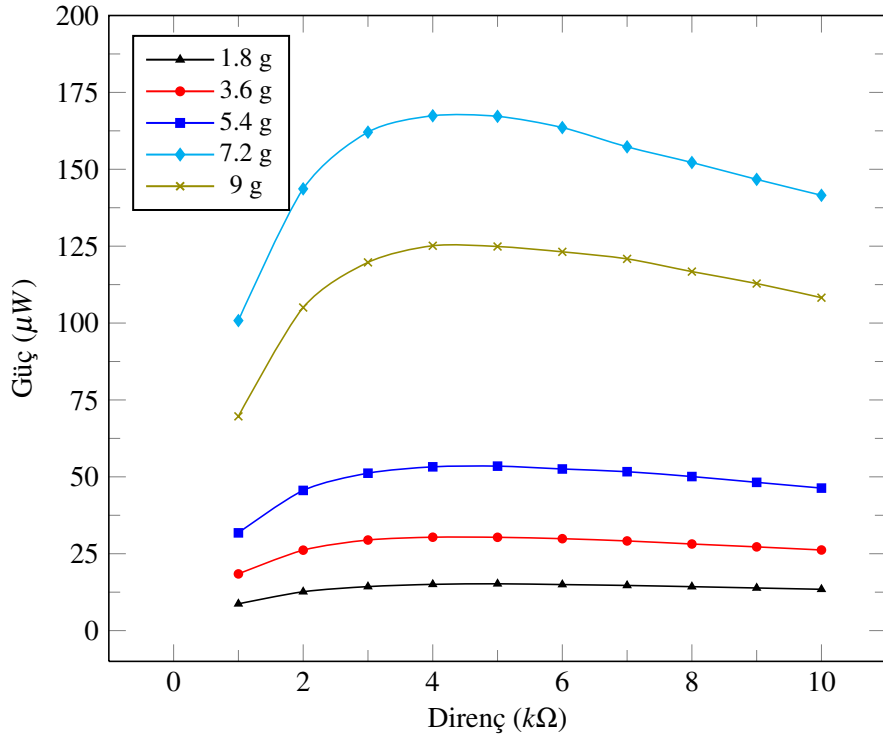


(e)

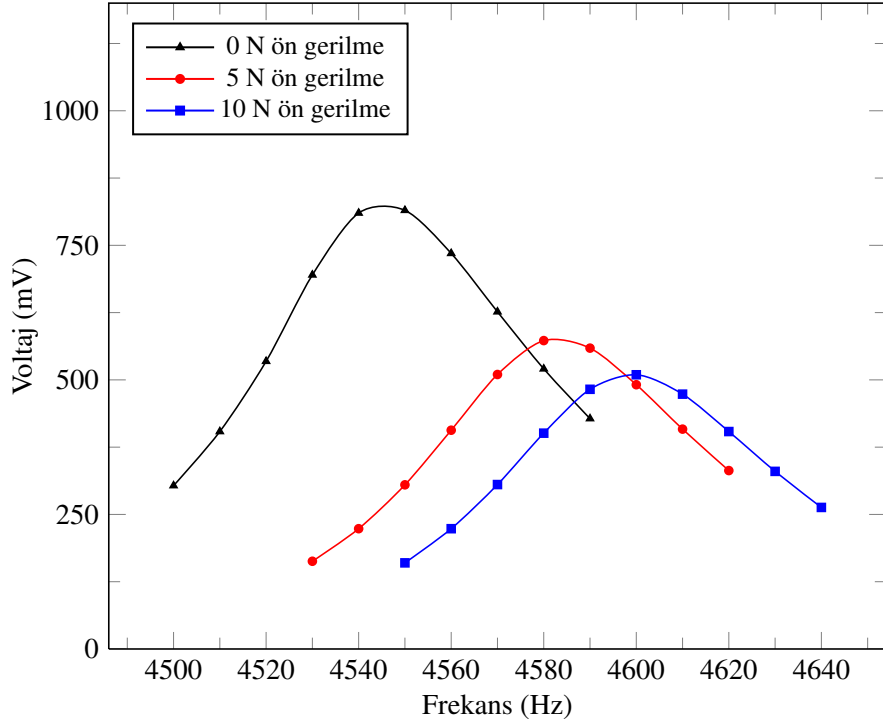
**Şekil 6.22:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZT2 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)



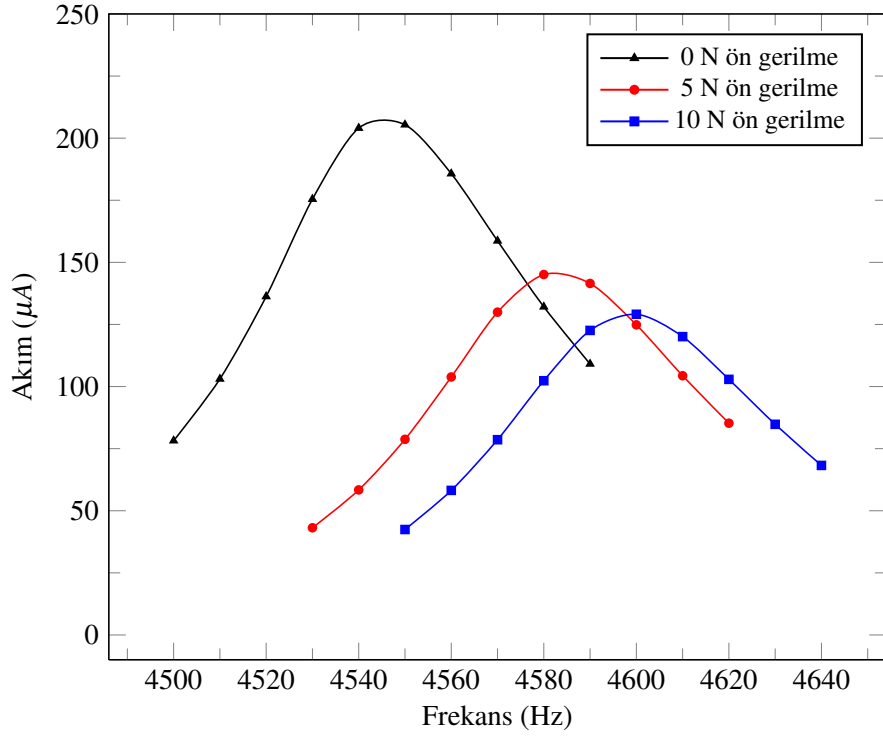
Şekil 6.23: C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün frekansa bağlı değişimi



Şekil 6.24: C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün elektriksel yüke bağlı değişimi



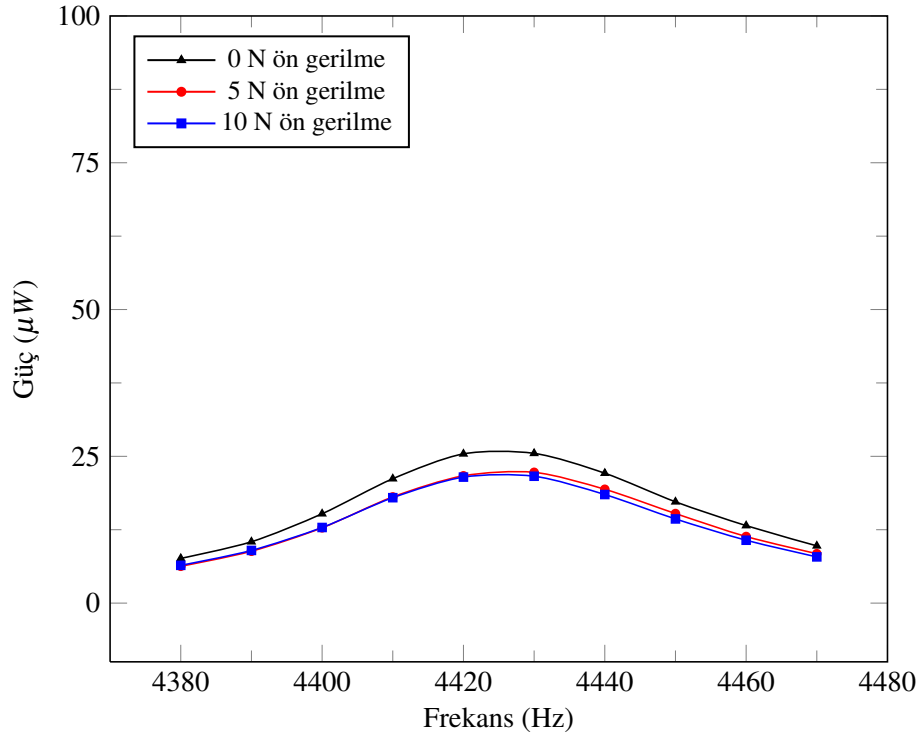
**Şekil 6.25:** C-PZT2 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen voltaj



**Şekil 6.26:** C-PZT2 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen akım

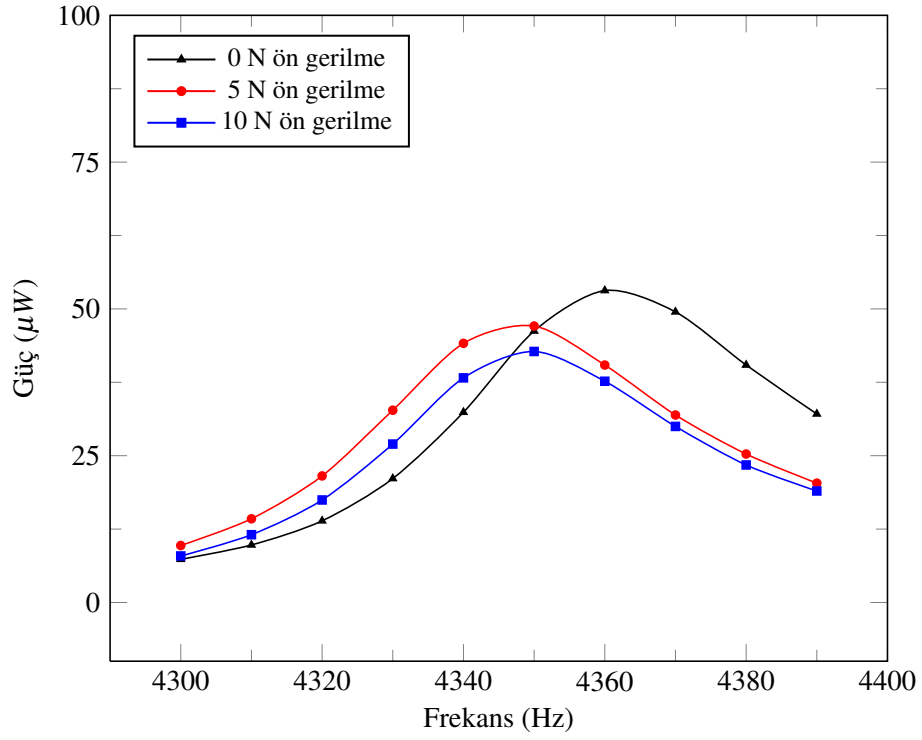
### 6.3.3 C-PZNN1 Transdüserin Enerji Hasatı Karakteristikleri

Kullanılan farklı ağırlıklar için transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi Şekil 6.27’de verilmektedir. Frekans arttıkça üretilen güç artmakta ve rezonans frekansına ulaşıldığında elde edilen güç de maksimum olmaktadır. Rezonans frekansı kullanılan ağırlığa göre değişmekle birlikte elde edilen enerji her zaman 0 N ön gerilmede gözlemlenmektedir. Kullanılan ağırlık arttırıldıkça rezonans frekansı azalmaktadır.

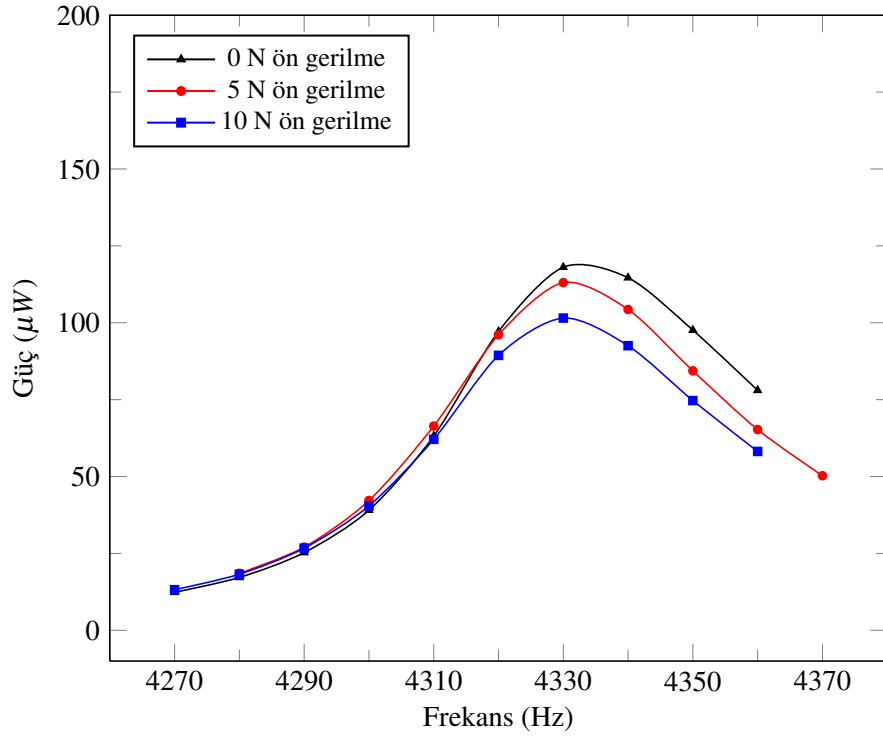


(a)

**Şekil 6.27:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi

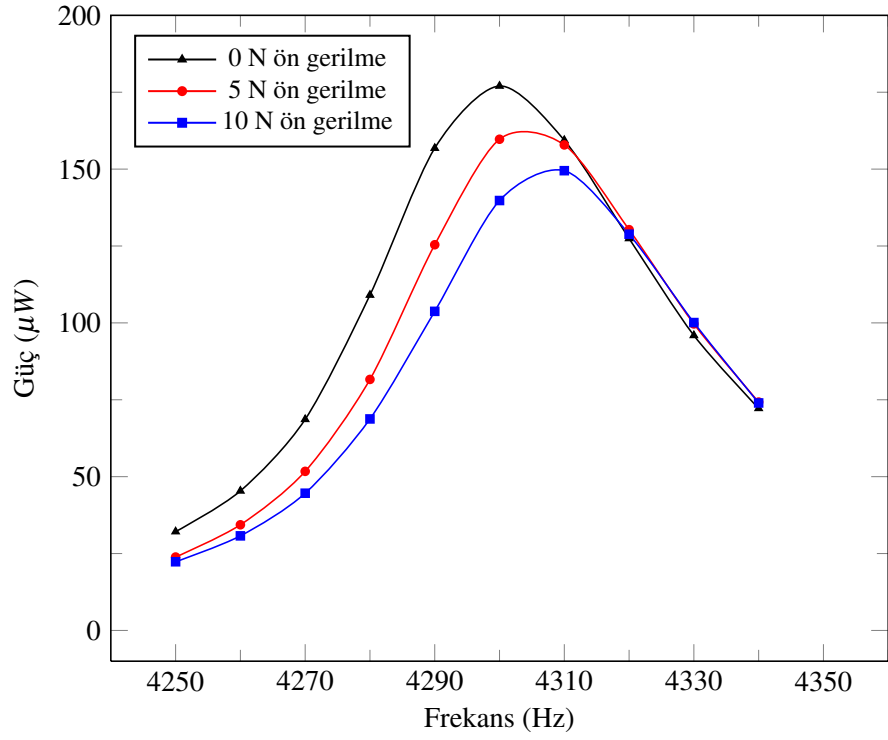


(b)

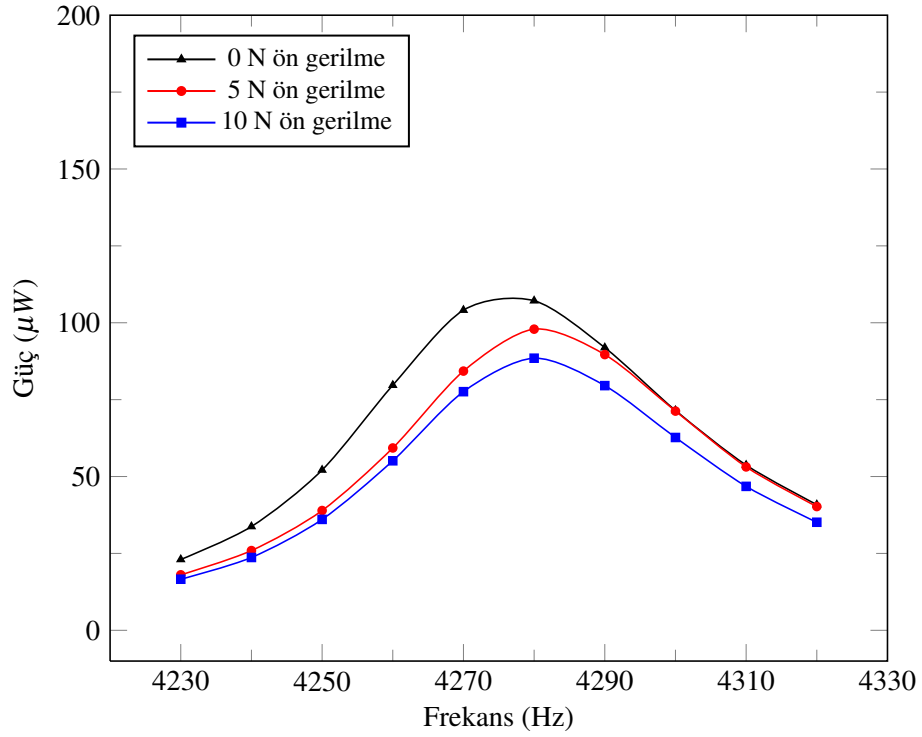


(c)

**Şekil 6.27:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)



(d)



(e)

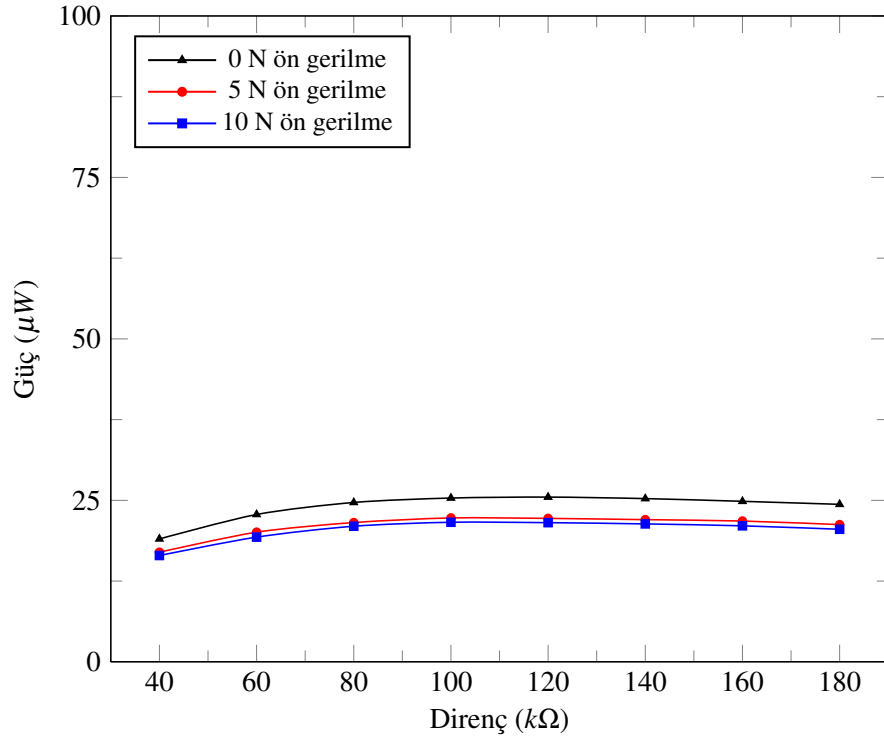
**Şekil 6.27:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün frekansa ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)

Kullanılan farklı ağırlıklar için transdüserin ürettiği gücün elektriksel yük ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi Şekil 6.28’de verilmektedir. Elektriksel yükün artmasıyla birlikte üretilen güç artmakta ve empedans uyumunun gerçekleştiği noktada güç maksimum olmaktadır. Sistemin elektriksel empedansı mekanik ön gerilme ve kullanılan ağırlıkla değişim göstermemektedir.

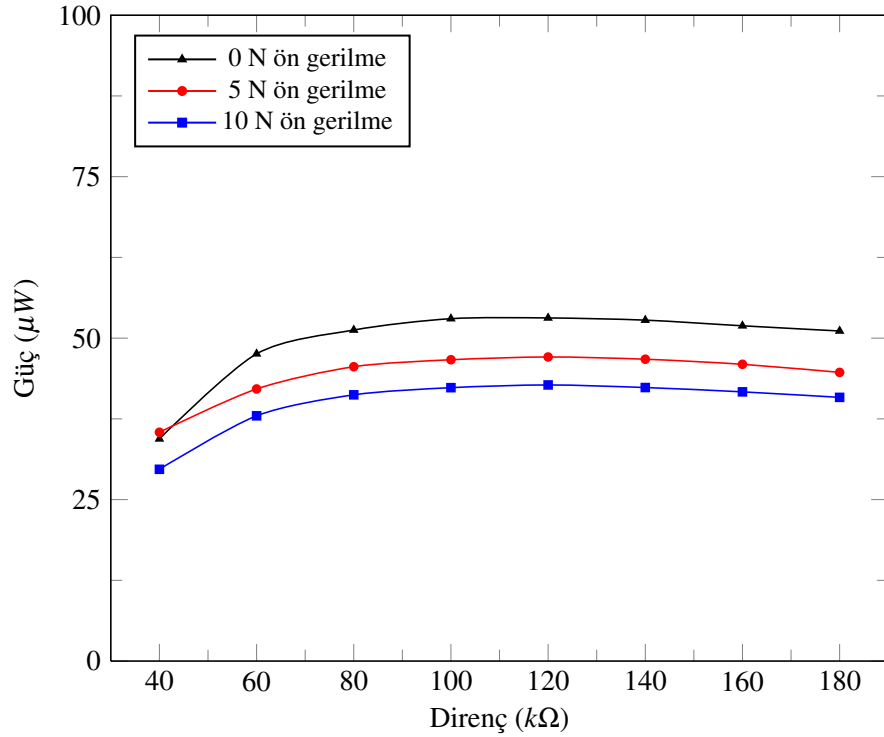
Her bir ağırlık için elde edilen en yüksek güç frekans (Şekil 6.29) ve elektriksel yüke (Şekil 6.30) bağlı olarak verilmiştir. Kullanılan ağırlığa bağlı olarak rezonans frekansındaki artış Şekil 6.29’da görülmektedir. 4300 Hz frekansta ve 100 k $\Omega$ ’luk elektriksel yük üzerinde 177  $\mu$ W’lık bir güç elde edilmiştir. C-PZNN1 transdüserinin elektriksel empedansı C-PZT1 ve C-PZT2’ye göre oldukça daha yüksektir. Bunun yanı sıra C-PZNN1 transdüserinin rezonans frekansı C-PZT1 ve C-PZT2 transdüserlerine göre daha düşüktür.

Şekil 6.31’te C-PZNN1 transdüserinin en yüksek güç ürettiği koşullarda (7.2 g ağırlık ile ve 100 k $\Omega$  elektriksel yük üzerinden ölçüm yapılarak) voltaj karakteristikleri değişen mekanik ön gerilme altında verilmiştir. Buna göre 0 N ön gerilme altında ve 4300 Hz frekansta 4170 mV’luk voltaj ölçülmüştür. Ön gerilme arttıkça voltajın düştüğü gözlemlenmektedir. 10 N’luk ön gerilme altında ve 4310 Hz frekansta 3830 mV voltaj ölçülmüştür.

Aynı şekilde Şekil 6.32’te C-PZNN1 transdüserinin en yüksek güç ürettiği koşullarda akım karakteristikleri, değişen mekanik ön gerilme altında verilmiştir. Buna göre 0 N ön gerilme altında ve 4300 Hz frekansta 42.5  $\mu$ A’lık akım ölçülmüştür. Ön gerilme arttıkça akımın da düştüğü gözlemlenmektedir. 10 N’luk ön gerilme altında ve 4310 Hz frekansta 38.8  $\mu$ A akım ölçülmüştür.

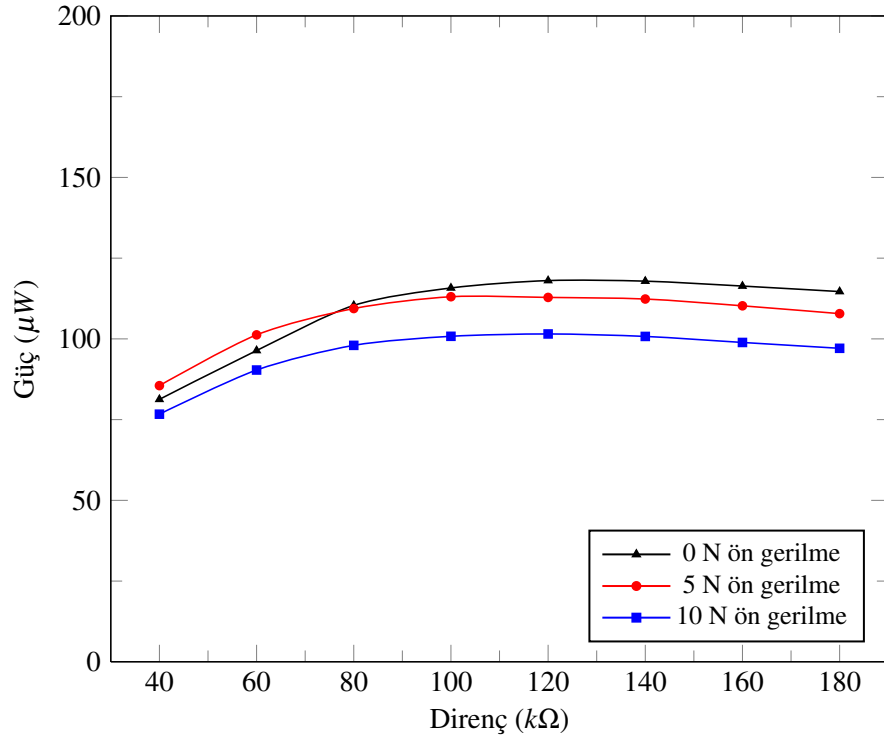


(a)

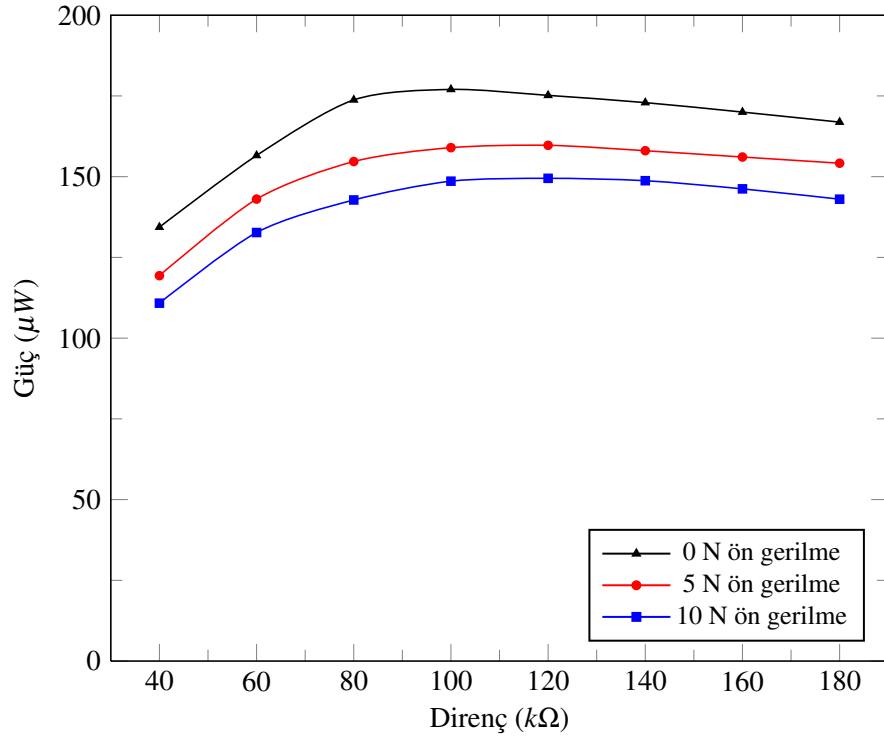


(b)

**Şekil 6.28:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi

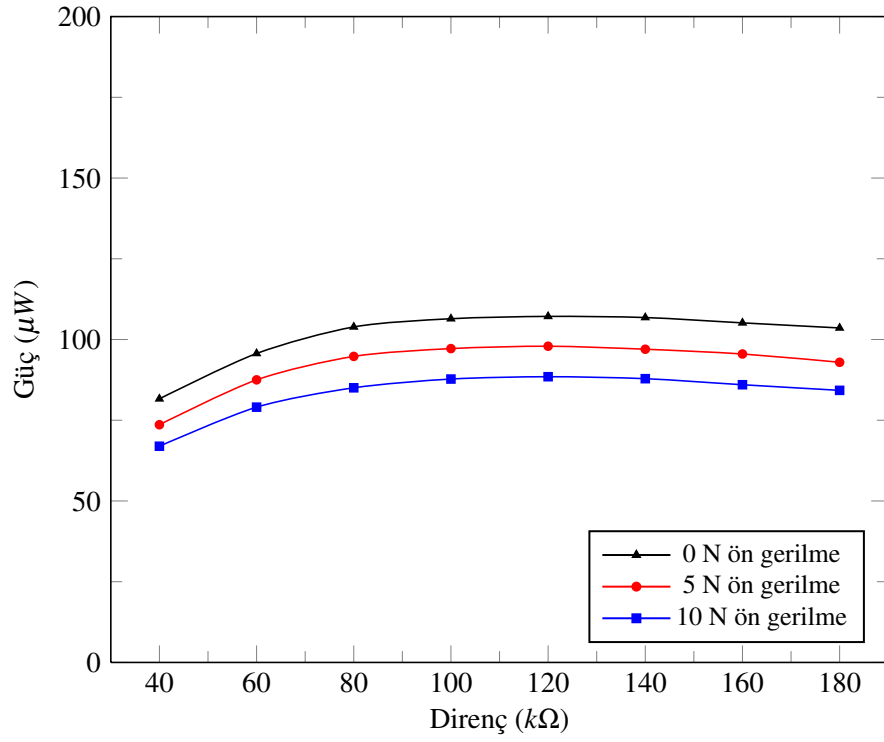


(c)



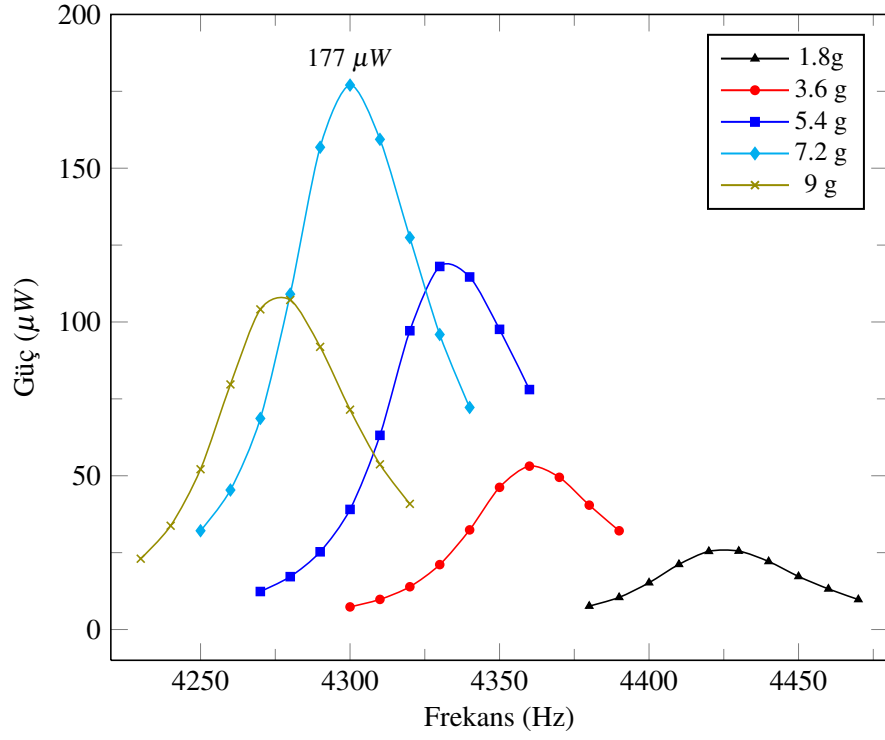
(d)

**Şekil 6.28:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)

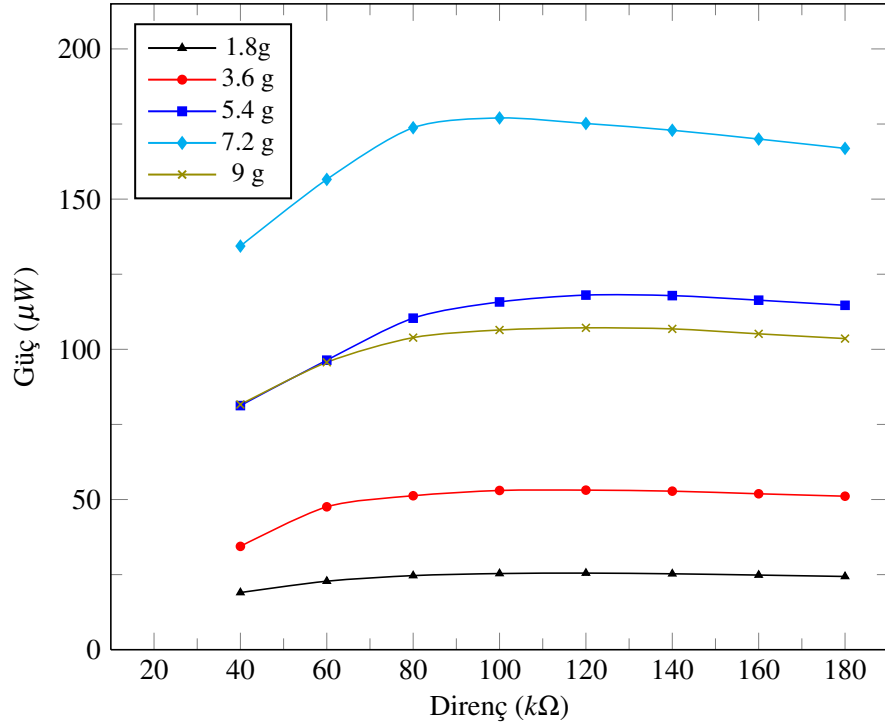


(e)

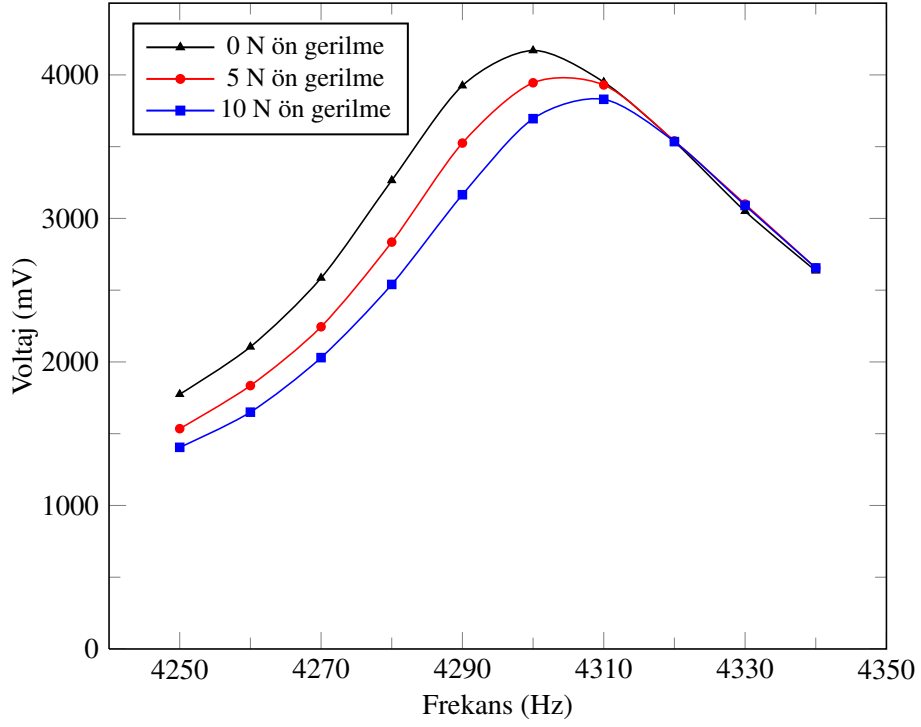
**Şekil 6.28:** a) 1.8 g, b) 3.6 g, c) 5.4 g, d) 7.2 g, e) 9.0 g ağırlık için C-PZNN1 transdüserin ürettiği gücün elektriksel yüke ve mekanik ön gerilmeye bağlı değişimi (devam)



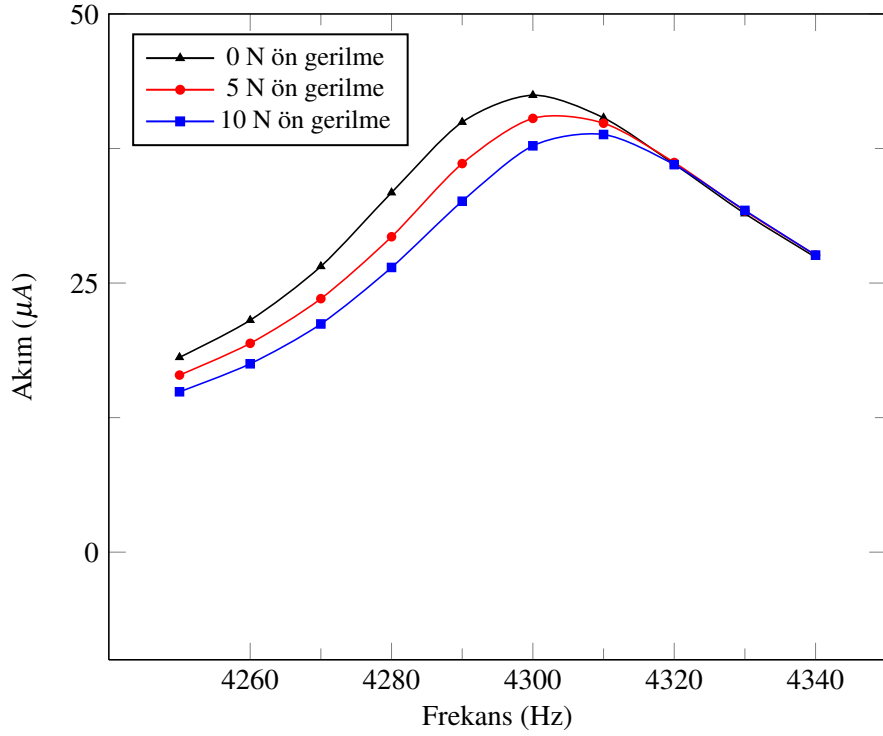
**Şekil 6.29:** C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün frekansa bağlı değişimi



**Şekil 6.30:** C-PZT2 transdüserinden, her bir ağırlık için elde edilen maksimum gücün elektriksel yüke bağlı değişimi



**Şekil 6.31:** C-PZNN1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen voltaj



**Şekil 6.32:** C-PZNN1 transdüserinden, maksimum güç elde edilen koşullarda, değişen mekanik ön gerilme için ölçülen akım

## 6.4 Değerlendirmeler

Sonuçlar göstermektedir ki farklı elektro-aktif malzemeler kullanılarak üretilen zil tipi transdüserlerin enerji hasatı karakteristikleri tamamen farklı olmaktadır. Sisteme eklenen ağırlık ve uygulanan mekanik ön-gerilme de sistemin davranışını etkileyen diğer önemli parametrelerdir.

1. Rezonans frekansı sisteme ilave edilen ağırlıkla önemli ölçüde değişmektedir. Transdüserlerde kullanılan elektro-aktif malzemenin cinsi de sistemin rezonans frekansı üzerinde etkiye sahiptir.

- C-PZT1 transdüserinin rezonans frekansı diğer transdüserlerden yüksektir. C-PZT2 transdüserin düşük rezonans frekansının, tabakalı disk yapısını oluşturmak amacıyla iki seramik disk arasında kullanılan iletken metalik tabakadan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- C-PZT2 transdüserin rezonans frekansı uygulanan ön gerilme ile değişiklik göstermektedir. Ancak bu değişim herhangi bir düzenli kalıp sergilememektedir. Dolayısıyla bu veriler ışığında ön gerilmenin rezonans frekansına etkisi konusunda bir kanıya varmak mümkün değildir.
- En düşük rezonans frekansı C-PZNN1 transdüserininki olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun sebebi PZT 5H seramiklerin katılığının PZNN-PZT seramiklerinden daha yüksek olması şeklinde açıklanabilir.

2. Elektriksel empedans, önemli ölçüde transdüserde kullanılan piezoelektrik malzemeye bağlı olarak değişmektedir. İlave ağırlık ya da mekanik ön-gerilme, elektriksel empedans üzerinde bir etkiye sahip değildir. Sistemden en fazla miktarda güç çekebilmek için enerji hasatı ünitesi ile üniteye bağlanacak olan elektronik devrenin elektriksel empedanslarının eşit olması gerekmektedir [60, 79]. Eğer enerji hasatı ünitesinin empedansı elektronik devrenin empedansından daha fazla olursa kayıplar artacak ve dolayısıyla depolanabilecek enerji miktarı azalacaktır. Diğer taraftan eğer

devrenin empedansı daha yüksek olduğunda daha yüksek oranda güç, kaynaktan elektriksel yüke doğru aktarılacak ve dolayısıyla enerji aktarım verimi artacaktır; ancak toplam direnç arttığından dolayı aktarılan enerji yine de azalacaktır.

Piezoelektrik transdüserler rezonans frekanslarından çok daha düşük frekanslarda çalıştırıldıklarında büyük orandan kapasitif davranış gösterirler. Buna bağlı olarak rezonans frekanslarından düşük frekanslarda çalışan piezoelektrik transdüserlerin empedansları şu şekilde ifade edilir:

$$Z = \frac{1}{2\pi f C_0} \quad (6.10)$$

Eşitlik 6.10'dan anlaşılacağı üzere piezoelektrik seramiğin kapasitansı arttıkça elektriksel empedansı azalmaktadır. Buradan hareketle;

- C-PZT2 transdüserin elektriksel empedansı diğer transdüserlere göre daha düşüktür. İnce piezoelektrik seramik tabakalarını bir araya getirerek tabakalı yapılar oluşturmak yapının kapasitansını arttırdığından dolayı empedansını düşürmektedir. Bu sonuç başka çalışmalarda [75] elde edilen sonuçlarla da uyumludur.
- C-PZNN1 transdüserinin elektriksel empedansı bu çalışmada kullanılan diğer transdüserlerden yüksektir. Bu da elektriksel empedans uyumunu sağlayabilmek için enerji hasatı devresinin daha yüksek empedansa sahip olması gerektiğini göstermektedir. Daha ince tabakalı PZNN-PZT seramik disklerini tabakalı yapılar oluşturacak şekilde kullanmak elektriksel empedansı azaltmak açısından faydalı olacaktır.

3. Sistemin ürettiği voltaj transdüserde kullanılan malzemenin cinsine, piezoelektrik seramik tabaka sayısına, ön-gerilmeye ve rezonans frekansına bağlı olarak değişmektedir.

- En yüksek voltaj (4170 mV) C-PZNN1 transdüseri ile ve 100 kΩ elektriksel yük üzerinde ölçülmüştür. C-PZT1 transdüseri ise 15 kΩ

direnç üzerinde 1150 mV voltaj oluşturmuştur. Piezoelektrik seramikler tarafından üretilen açık devre voltajı şu şekilde verilmektedir;

$$V = -g_{33}T_3t \quad (6.11)$$

Burada t seramik tabaka kalınlığıdır. Dolayısıyla kalınlık ve uygulanan kuvvete dik olan yüzey alanı ve transdüserin  $g_{33}$  değeri, üretilen voltaj için önemli parametrelerin başında gelmektedir. Tablo 6.1’de gösterildiği üzere PZNN-PZT seramiklerinin  $g_{33}$  katsayısı 0.055 V/mN, PZT 5H seramiklerinin ise 0.019 V/mN’dur. Arada 4 kata yakın fark bulunmaktadır. Dolayısıyla sonuçlar Eşitlik 6.11 ile de uyum içerisindedir.

- C-PZT2 transdüseri en düşük voltajı üretmektedir ancak ürettiği güç miktarı C-PZT1 transdüserinden daha fazladır. Dolayısıyla anlaşılmaktadır ki en yüksek miktarda güç üretebilmesi için transdüserin en yüksek voltajı üretmesi gerekli değildir. İnce seramik disk tabakaları Eşitlik 6.11’de görüleceği üzere daha düşük voltaj üretecektir. Ancak transdüserin artan kapasitansı elektronik devreye iletilebilen gücün oranının artmasını sağlayacaktır [75].

4. Ölçülen akım değerleri malzeme özellikleri ve piezoelektrik seramik tabaka sayısına bağlı olarak değişmektedir.




- Deneysel çalışmada kullanılan transdüserler içerisinde en yüksek akımı üreten transdüser C-PZT2 transdüseridir. C-PZT2 transdüseri 4 k $\Omega$  direnç üzerinden 205.4  $\mu$ A akım geçirmektedir. C-PZT2’nin düşük empedansı ile eşleşen elektriksel yükün de düşük empedanslı olması, yüksek akım miktarının sebebidir.
- En düşük akım miktarı ise 100 k $\Omega$  direnç üzerinden ölçülmüş ve C-PZNN1 transdüseri ile üretilmiştir. Bu transdüserin çok yüksek empedansa sahip olması ölçülen düşük akımında sebebidir.

5. Tüm bunlara bağlı olarak üretilen güç miktarı da transdüserde kullanılan malzemeye ve piezoelektrik seramik tabaka sayısına bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen güç aynı zamanda titreşimin frekansına ve mekanik ön-gerilmeye de önemli derecede bağlıdır. Enerji hasatı ünitesi ile elektronik devre arasındaki empedans uyumu da sistemin performansı üzerinde son derece etkilidir.

- En yüksek güç rezonans frekansında elde edilmektedir.
- Ön gerilme arttıkça üretilen güç azalmaktadır.
- C-PZNN1 transdüseri 177  $\mu\text{W}$  güç üretirken C-PZT2 transdüseri 167.4  $\mu\text{W}$ , C-PZT1 transdüseri ise 89.5  $\mu\text{W}$  güç üretmiştir.
- Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki ince tabakalardan oluşan tabakalı yapılar, tek tabakalı kalın seramiklere göre daha fazla enerji üretmektedir. Bu, tabakalı yapıların empedanslarının düşük olması sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.
- PZNN-PZT seramik kompozisyonları enerji hasatı uygulamaları açısından gelecek vadede kompozisyonlardır. C-PZNN1 transdüseri tarafından üretilen enerji C-PZT1 transdüseri tarafından üretilen enerjinin iki katıdır.
- Empedans eşleştirme enerji hasatı uygulamalarında çok büyük önem arz etmektedir. En yüksek güç, elektriksel yükün empedansı ile üretici empedansı eşleştiğinde elde edilmektedir.
- Transdüserin elektriksel empedansı ne kadar düşük olursa enerji hasatı ünitesinin elektronik devrelere entegrasyonu da o kadar kolay olacaktır.

DeneySEL çalışmada kullanılan zil tipi transdüserlerin enerji hasatı özelliklerinin karşılaştırması Tablo 6.3'te verilmiştir.

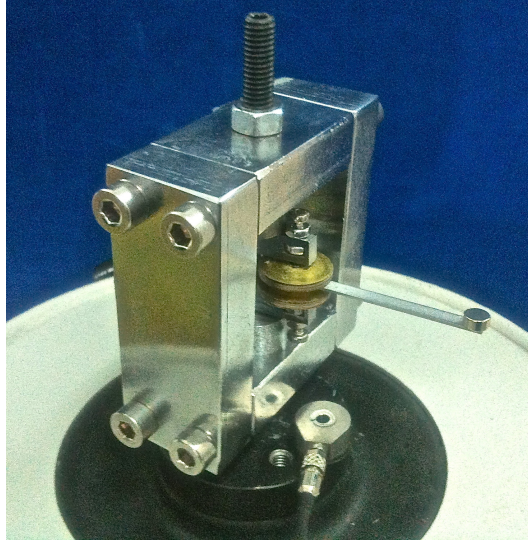
**Çizelge 6.3:** Deneysel çalışmada kullanılan zil tipi transdüserlerin özelliklerinin karşılaştırılması

			
ÖZELLİK	C-PZT1	C-PZT2	C-PZNN1
Rezonans Frekansı	Yüksek	Orta	Düşük
Elektriksel Empedans	Orta	Düşük	Yüksek
Üretilen Güç	Düşük	Orta	Yüksek
Üretilen Voltaj	Orta	Düşük	Yüksek
Üretilen Akım	Orta	Yüksek	Düşük

## 7. PİEZOELEKTRİK KOMPOZİT YAPI İLE DÜŞÜK FREKANSLARDA ENERJİ HASATI

Deneysel düzenek Şekil 6.12’de verilen düzeneğin tamamen aynısıdır.

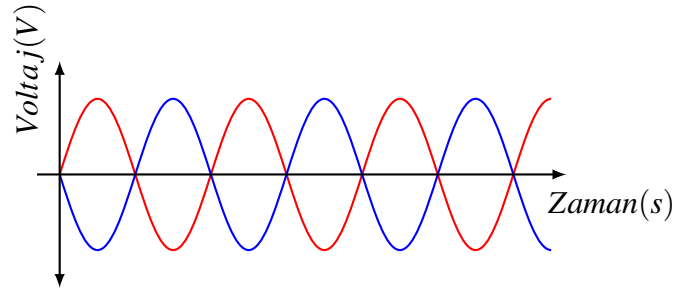
Şekil 7.1’de verilmiş olan enerji hasatı ünitesi bir LDS V-406 (Brüel & Kjør Sound & Vibration Measurement A/S, Denmark) elektromanyetik sarsıcının armatürüne bağlanmış ve armatür Agilent Technologies DSO-X 3014A model bir osiloskopua entegre vaziyette bulunan bir sinyal üretici ile değişen frekanslarda sarsılmıştır. Oluşan ivme sarsıcının armatürüne bağlı olan bir Measurement Specialties Inc. Model 7101A-0050 ivmeölçer ile ölçülmüştür. Sarsıcının yükselticisi, oluşan ivme 2 g ( $20m/s^2$ ) olacak şekilde ayarlanmıştır.



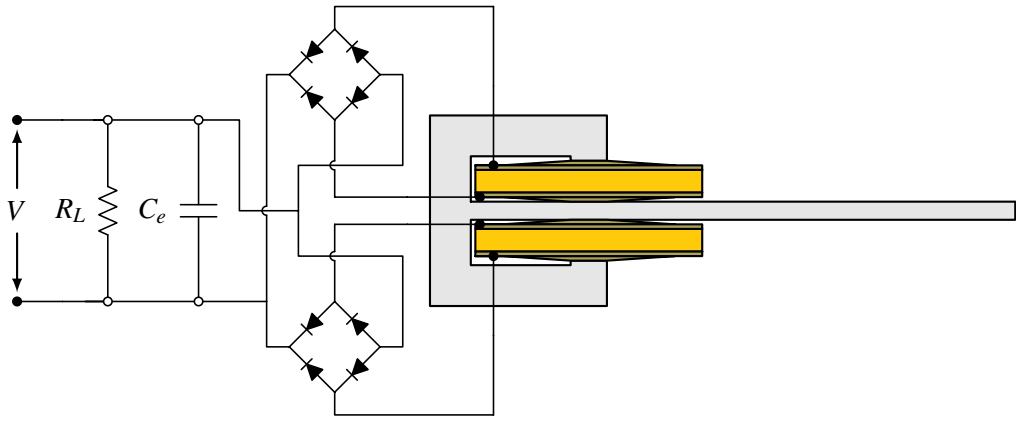
**Şekil 7.1:** Enerji Hasatı Ünitesi

Enerji hasatı ünitesinde iki adet zil tipi transdüser bulunmaktadır ve sinüs dalgası şeklinde bir titreşim altında, sistem birinci titreşim modunda hareket ettiğinde (Şekil 5.2(a)) bu iki transdüserden biri çubuk tarafından sıkıştırılırken diğeri üzerindeki kuvvet azalacaktır. Dolayısıyla enerji hasatı ünitesinden elde edilen voltaj Şekil 7.2’de görüldüğü gibi olacaktır. Bu durumda her iki transdüser için ayrı ayrı tam köprü doğrultucuların kullanılması gerekecektir. Doğrultulmuş olan voltaj bir kapasitörün ( $C_e$ ) doldurulması için kullanılacaktır. Enerji hasatı ünitesinin deneysel çalışmalarında kullanılan elektronik devrenin şeması Şekil 7.3’te verilmiştir.

Deneysel süreçte irdelenen değişkenler:



**Şekil 7.2:** Sinüs dalgası şeklinde uygulanan titreşim altında iki transdüserli enerji hasatı ünitesinden elde edilen açık devre voltajı



**Şekil 7.3:** Deneylerde kullanılan enerji hasatı devresi

1. Elektroaktif malzeme
2. Uç kütle
3. Yük empedansı
4. Frekans

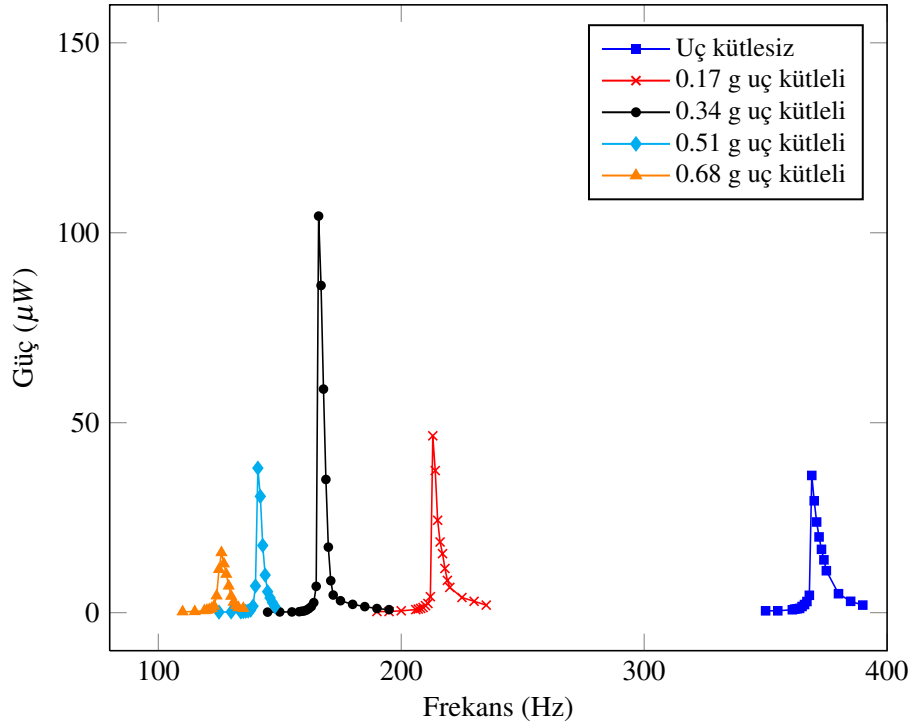
### 7.1 B-PZT1 yapısının enerji hasatı özellikleri

B-PZT1 yapısından elde edilen güç, uç kütlelerinin bir fonksiyonu olarak Şekil 7.4'te verilmiştir. Uç kütlelerinin 0.68 g'a yükseltilmesiyle  $f_{res}$  368 Hz'ten 126 Hz'e düşmüştür (Çizelge 7.1). Elde edilen en yüksek güç 0.34 g uç kütle ile, 172 Hz frekansta ve 80 k $\Omega$  direnç üzerinden 104.04  $\mu$ W olarak ölçülmüştür.

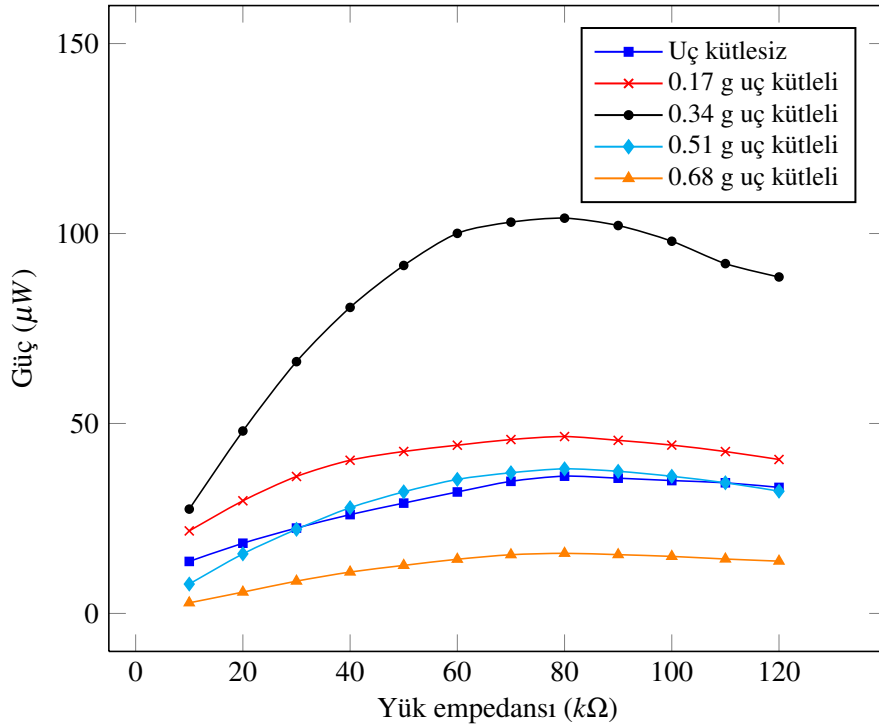
Elde edilen gücün elektriksel yüke göre değişimi Şekil 7.5'te verilmiştir. Artan yükle birlikte güç de hızlı bir şekilde artmakta ve 80 k $\Omega$ 'da 104.04  $\mu$ W değerine ulaşmakta, daha sonra artan elektriksel yükle yavaş bir şekilde düşüşe geçmektedir.

**Çizelge 7.1:** B-PZT1 transdüser için uç kütesine bağlı olarak rezonans frekansı ve elde edilen gücün değişimi

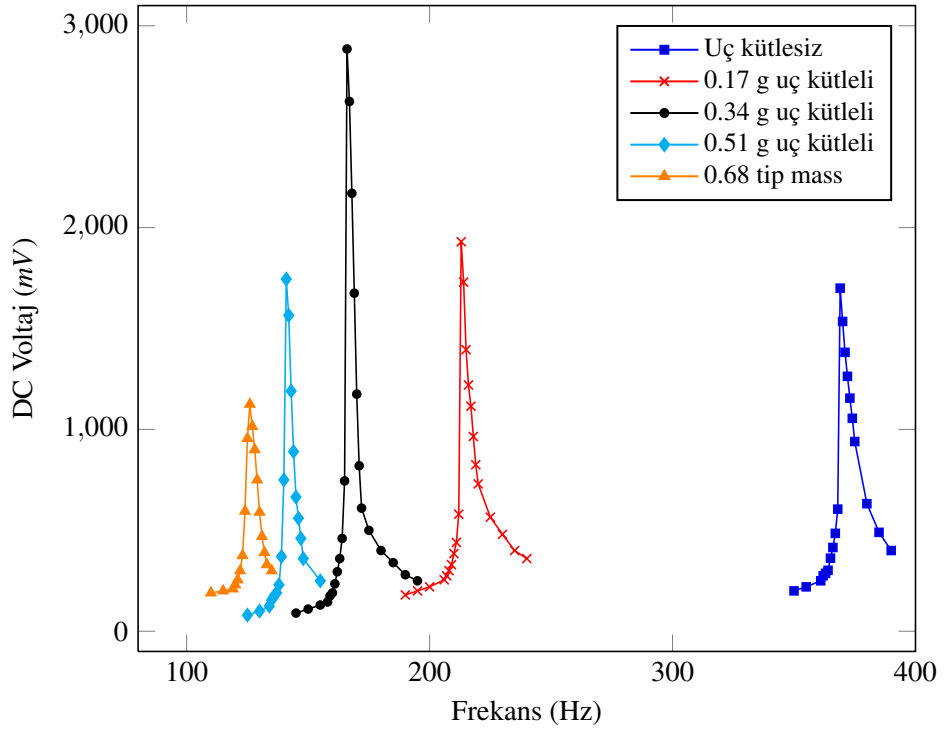
Uç kütle (g)	Rezonans frekansı (Hz)	Üretilen güç ( $\mu$ W)
0	368	36.13
0.17	213	46.56
0.34	166	104.04
0.51	141	38.06
0.68	126	15.82



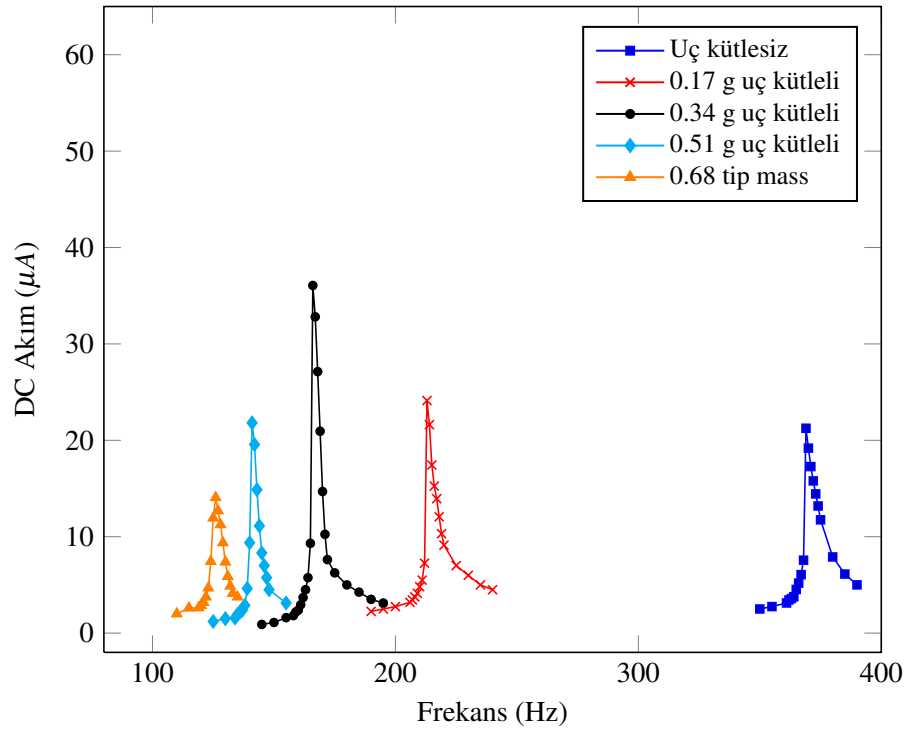
**Şekil 7.4:** B-PZT1 transdüserinden elde edilen gücün frekans ve uç kütlelerine bağlı değişimi



**Şekil 7.5:** B-PZT1 transdüserinden elde edilen gücün yük empedansı ve uç kütlelerine bağlı değişimi



**Şekil 7.6:** B-PZT1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağılı olarak elde edilen voltaj



**Şekil 7.7:** B-PZT1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağılı olarak elde edilen akım

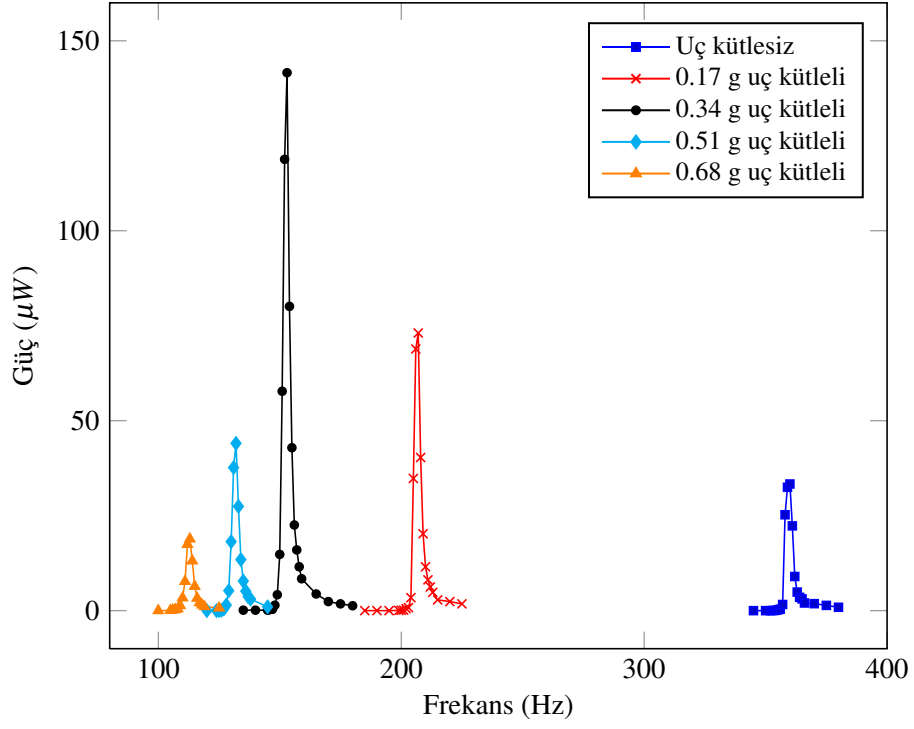
## 7.2 B-PZT2 yapısının enerji hasatı özellikleri

B-PZT2 yapısından elde edilen güç, uç kütesinin bir fonksiyonu olarak Şekil 7.8'te verilmiştir. Uç kütesinin 0.68 g'a yükseltilmesiyle  $f_{res}$  360 Hz'ten 113 Hz'e düşmüştür (Çizelge 7.2). Elde edilen en yüksek güç 0.34 g uç kütle ile, 153 Hz frekansta ve 40 k $\Omega$  direnç üzerinden 141.61  $\mu$ W olarak ölçülmüştür.

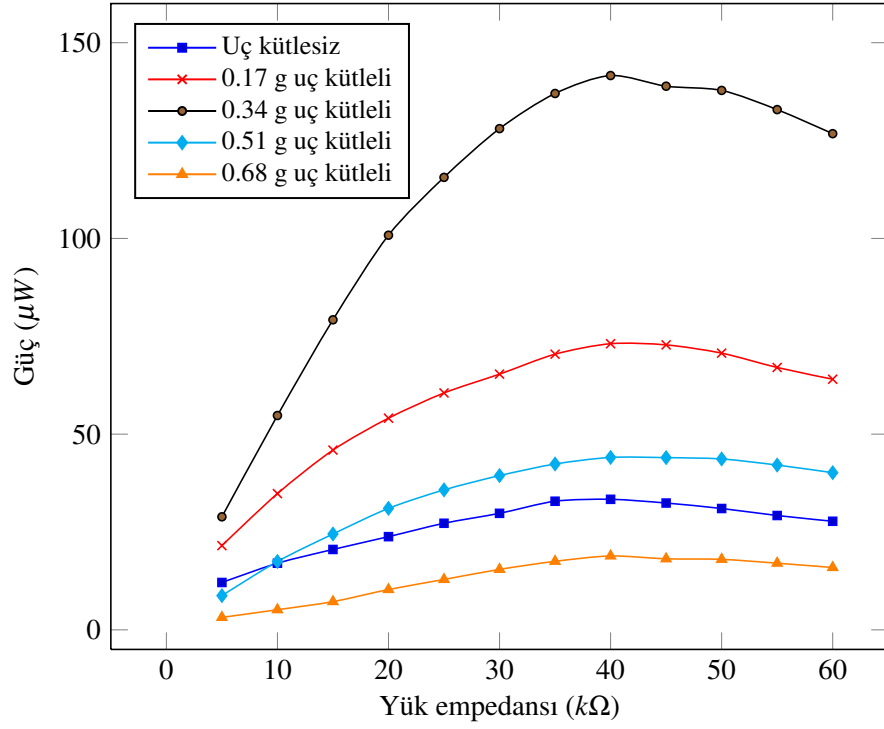
Elde edilen gücün elektriksel yüke göre değişimi Şekil 7.9'te verilmiştir. Artan yüklerle birlikte güç de hızlı bir şekilde artmakta ve 40 k $\Omega$ 'da 141.61  $\mu$ W değerine ulaşmakta, daha sonra artan elektriksel yüklerle yavaş bir şekilde düşüşe geçmektedir.

**Çizelge 7.2:** B-PZT2 transdüser için uç kütesine bağlı olarak rezonans frekansı ve elde edilen gücün değişimi

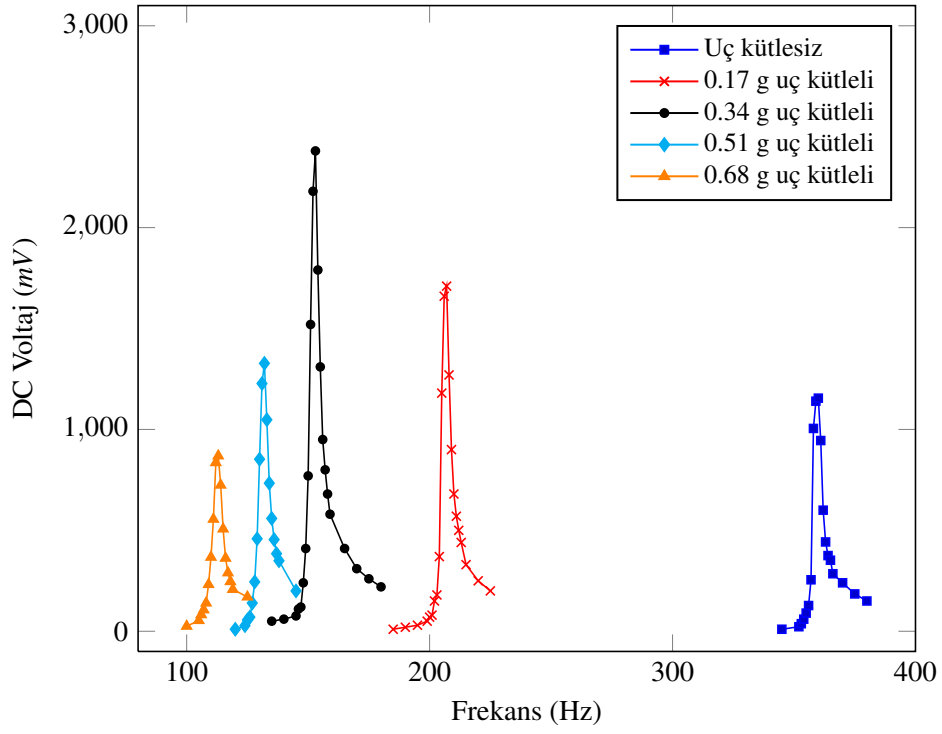
Uç kütle (g)	Rezonans frekansı (Hz)	Üretilen güç ( $\mu$ W)
0	360	33.35
0.17	207	73.1
0.34	153	141.61
0.51	132	44.05
0.68	113	18.88



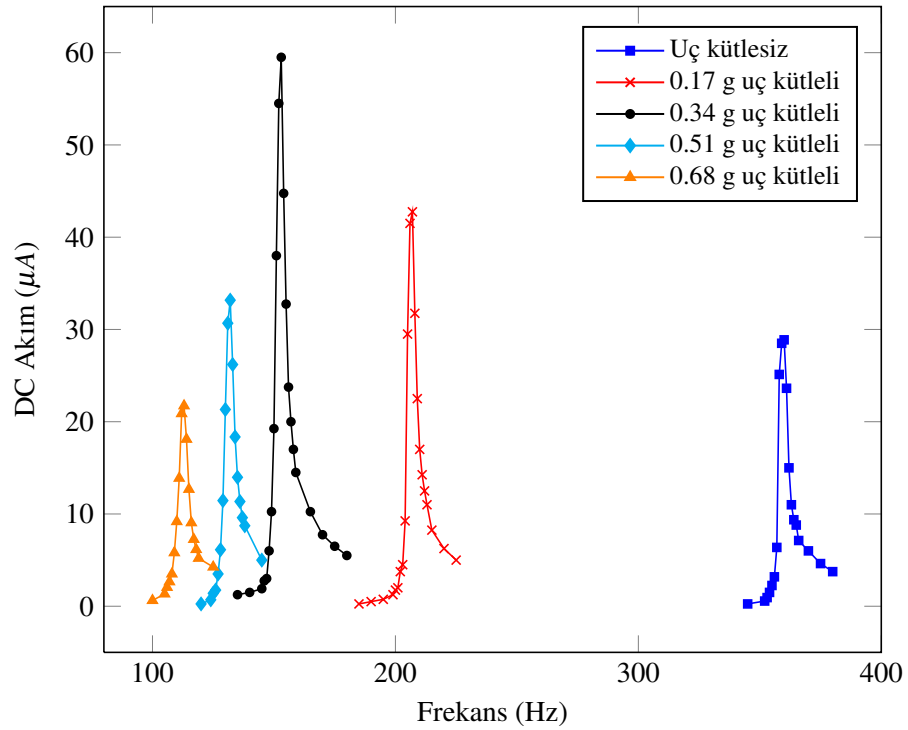
**Şekil 7.8:** B-PZT2 transdüserinden elde edilen gücün frekans ve uç kütleğine bağlı değişimi



**Şekil 7.9:** B-PZT2 transdüserinden elde edilen gücün yük empedansı ve uç kütleğine bağlı değişimi



**Şekil 7.10:** B-PZT2 transdüserinden frekans ve kütleyle bağılı olarak elde edilen voltaj



**Şekil 7.11:** B-PZT2 transdüserinden frekans ve kütleyle bağılı olarak elde edilen akım

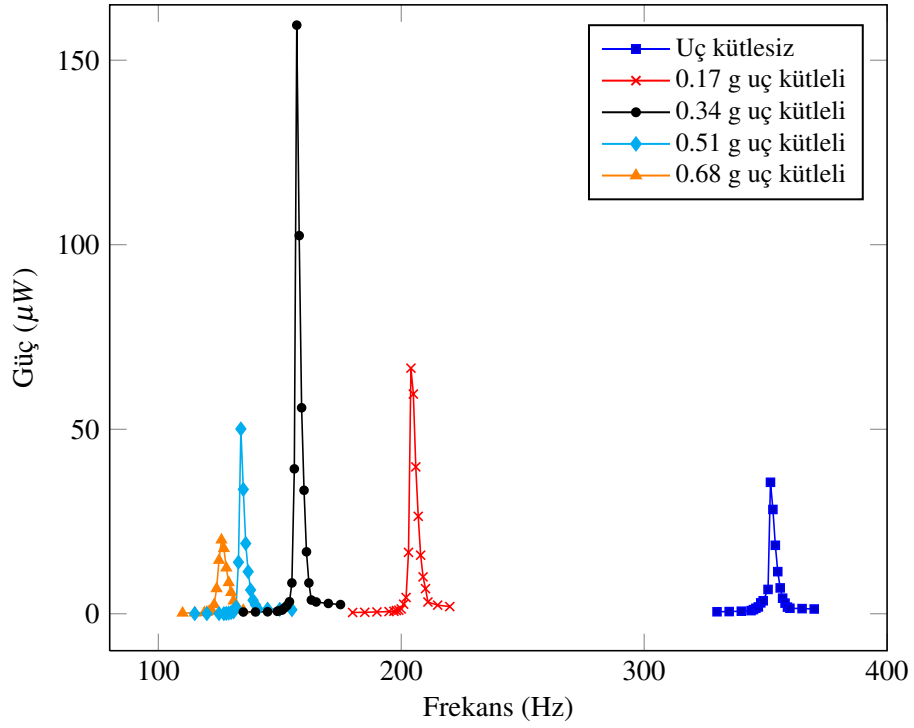
### 7.3 B-PZNN1 yapısının enerji hasatı özellikleri

B-PZNN1 yapısından elde edilen güç, uç kütesinin bir fonksiyonu olarak Şekil 7.12'de verilmiştir. Uç kütesinin 0.68 g'a yükseltilmesiyle  $f_{res}$  352 Hz'ten 126 Hz'e düşmüştür (Çizelge 7.3). Elde edilen en yüksek güç 0.34 g uç kütle ile, 167 Hz frekansta ve 400 k $\Omega$  direnç üzerinden 159.5  $\mu$ W olarak ölçülmüştür.

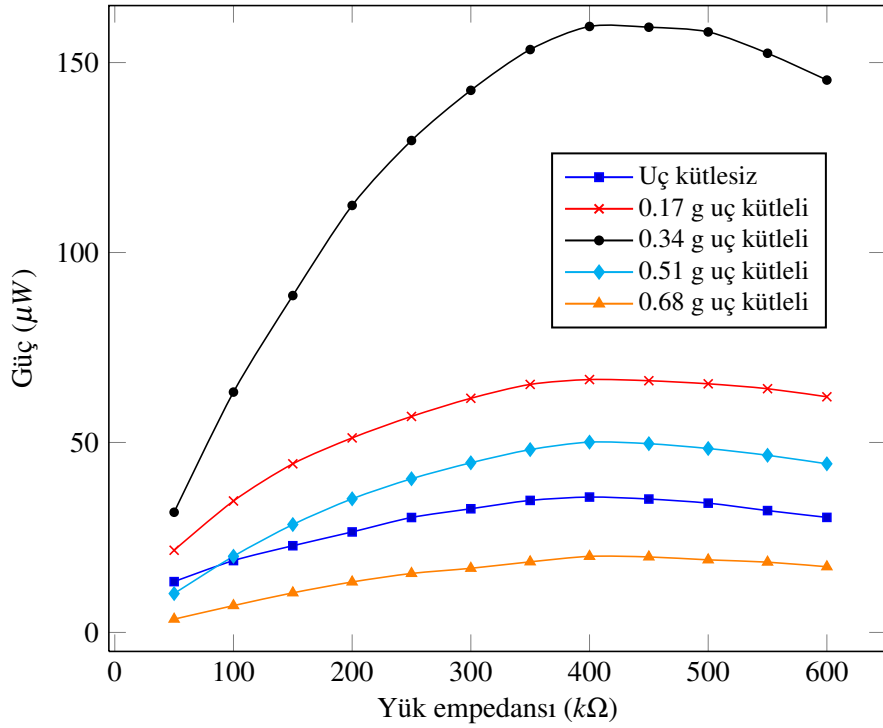
Elde edilen gücün elektriksel yüke göre değişimi Şekil 7.13'te verilmiştir. Artan yüklerle birlikte güç de hızlı bir şekilde artmakta ve 400 k $\Omega$ 'da 159.5  $\mu$ W değerine ulaşmakta, daha sonra artan elektriksel yüklerle yavaş bir şekilde düşüşe geçmektedir.

**Çizelge 7.3:** B-PZNN1 transdüser için uç kütesine bağlı olarak rezonans frekansı ve elde edilen gücün değişimi

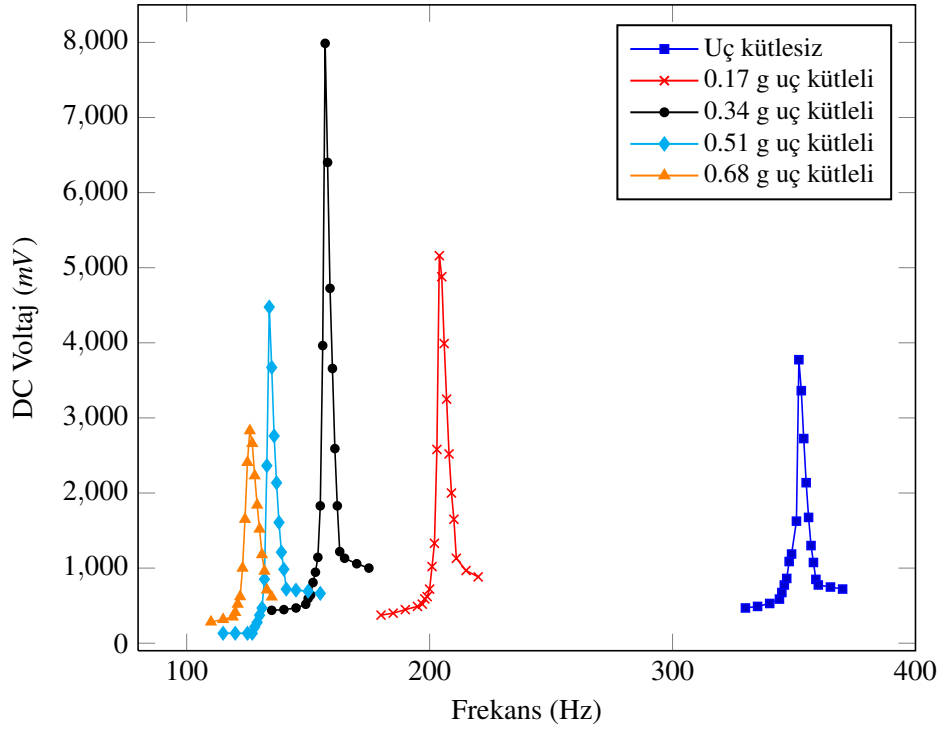
Uç kütle (g)	Rezonans frekansı (Hz)	Üretilen güç ( $\mu$ W)
0	352	35.63
0.17	204	66.56
0.34	157	159.5
0.51	134	50.09
0.68	126	20.02



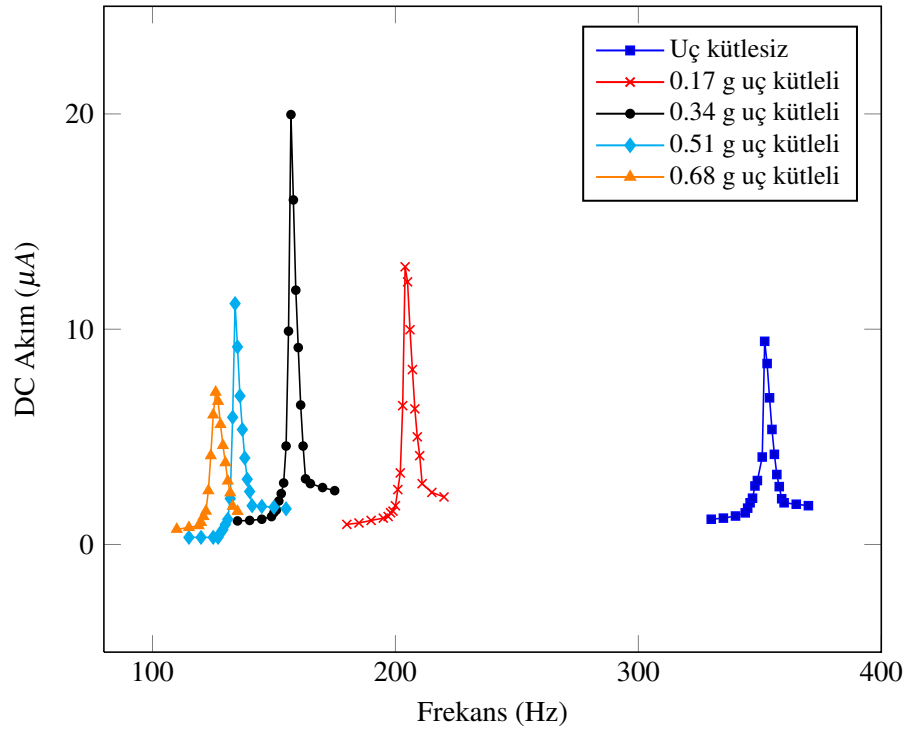
Şekil 7.12: B-PZNN1 transdüserinden elde edilen gücün frekans ve uç kütlesine bağlı değişimi



Şekil 7.13: B-PZNN1 transdüserinden elde edilen gücün yük empedansı ve uç kütlesine bağlı değişimi

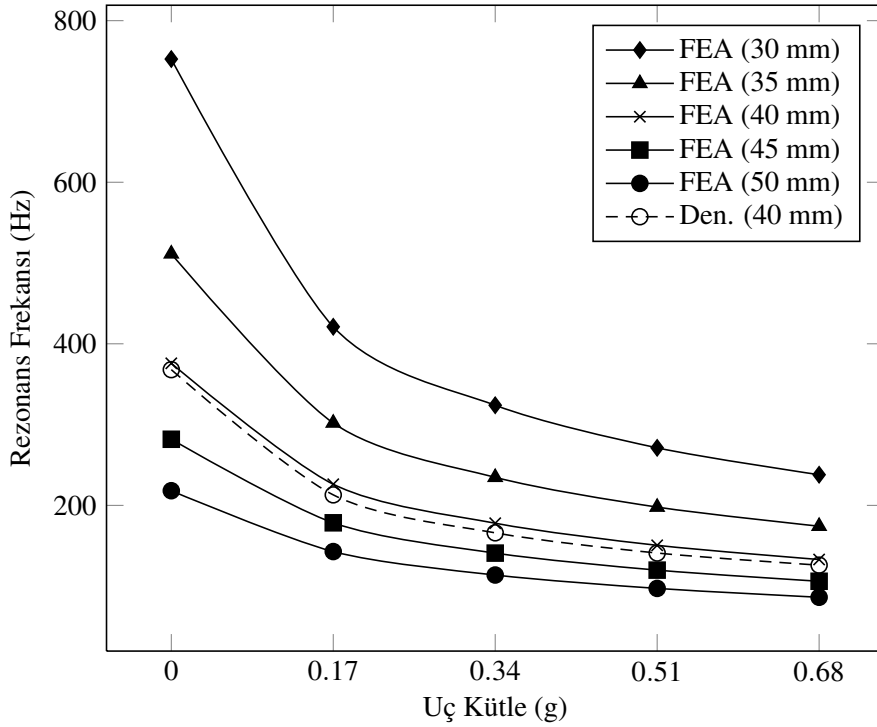


**Şekil 7.14:** B-PZNN1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağılı olarak elde edilen voltaj



**Şekil 7.15:** B-PZNN1 transdüserinden frekans ve kütleyle bağılı olarak elde edilen akım

Değişen uzunluklardaki çubuklar için enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansının ( $f_{res}$ ) değişimi Şekil 7.16’da verilmiştir.  $L = 40\text{mm}$ ,  $a = 7\text{mm}$  ve  $h = 0.5\text{mm}$  ölçülerindeki çubuk için  $f_{res}$  368 Hz gibi düşük değerlere ulaşabilmektedir. Rezonans frekansını daha da azaltıp, transdüserlerde oluşan deplasmanı arttırabilmek için sisteme uç kütlesi eklenmiş ve rezonans frekansları eklenen kütleyle birlikte 200 HZ’in altına düşürülmüştür.



**Şekil 7.16:** Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ve deneysel sonuçlara (Den.) göre elde edilen rezonans frekansının çubuk kalınlığı ve uç kütlesine göre değişimi

#### 7.4 Hasat Edilen Enerjinin Depolanması

Bir elektriksel yük kaynağı bir direnç ve bir kapasitöre seri bağlandığında kaynaktan çekilen akım başlangıçta yüksektir. Ancak kapasitör yük depoladıkça ve kapasitör voltajı kaynağın voltajına yaklaştıkça kaynaktan çekilen akım düşer. Kapasitörün yüklenmesi kapasitörün plakaları arasında enerji depolanması anlamına gelmektedir. Kapasitörün yük depolayabilme hızı zaman sabiti (RC) ile tanımlanmaktadır.

Kapasitörde depolanan yük (Q) şu şekilde verilir:

$$Q = CV \quad (7.1)$$

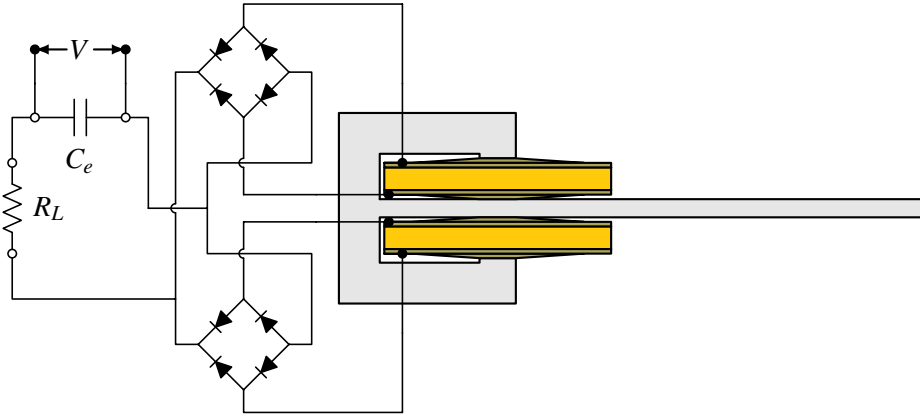
Burada C Farad cinsinden kapasitörün sığası, V voltaj cinsinden kapasitörün uçları arasındaki voltaj ve Q da Coulomb cinsinden elektriksel yük olarak verilmektedir.

Kapasitör üzerinde depolanan enerji şu şekilde verilmektedir:

$$W = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 \quad (7.2)$$

Burada W Joule cinsinden enerjiyi vermektedir.

470  $\mu F$ 'lık bir kapasitör üzerinde depolanan yük ve enerjiyi ölçmek ve hesaplamak amacıyla kullanılan elektronik devre Şekil 7.17'de verilmiştir.

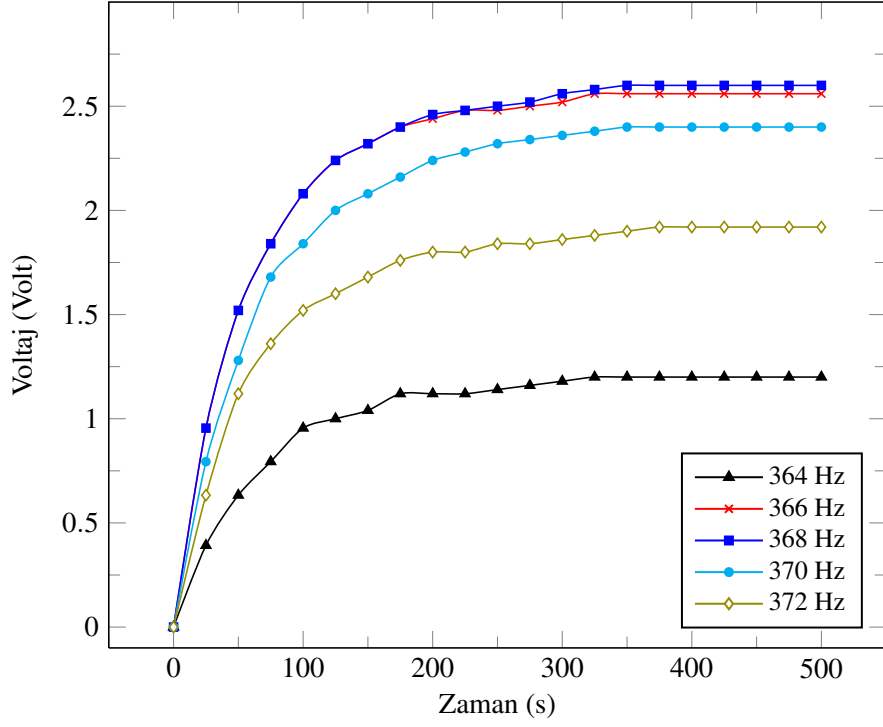


**Şekil 7.17:** Kapasitör üzerinde depolanan enerjinin ölçümü amacıyla kullanılan devre

Uç kütle bağlanmamış B-PZT1 transdüseri ile 470 $\mu F$ 'lık bir kapasitör üzerinden, frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülen voltaj Şekil 7.18'de verilmiştir. 368 Hz'te çalıştırılan enerji hasatı ünitesi kullanılarak yapılan çalışmada kapasitör üzerinden ölçülen voltaj 300 saniyelik bir zaman diliminde 2.5 V'a yükselmektedir. Frekans arttıkça kapasitör üzerinde ölçülen voltaj da yükselmekte ve rezonans frekansına geldiğinde voltaj en yüksek değerine ulaşmaktadır. Rezonans frekansının üzerindeki frekanslarda ölçülen voltaj yeniden azalmaktadır.

Kapasitör üzerinde depolanan yük ve enerji, ölçülen voltaj değerleri kullanılarak, sırasıyla Eşitlik 7.1 ve Eşitlik 7.2 yardımıyla hesaplanmıştır. Uç kütle bağlanmamış

B-PZT1 transdüseri ile yapılan ölçümlerin sonucu olarak  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan elektriksel yük Şekil 7.19'da verilmiştir. Depolanan enerji ise Şekil 7.20'de görülmektedir. Kapasitör üzerinde depolanan yük en yüksek  $1.25 \times 10^{-3}$  Coulomb değerine ulaşırken depolanan enerji ise  $1.6 \times 10^{-3}$  Joule olarak hesaplanmıştır.



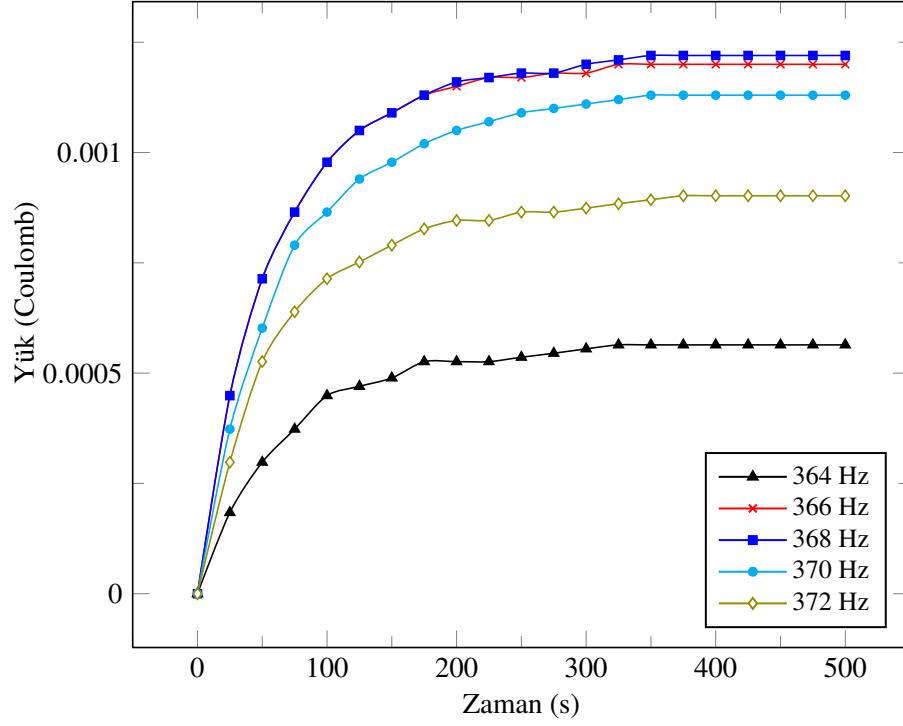
**Şekil 7.18:** Uç kütlesi olmayan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi

Sırasıyla 0.17 g, 0.34 g, 0.51 g, 0.68 uç kütlesine sahip B-PZT1 transdüserine bağlanmış olan  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltaj değerleri, yine sırasıyla, Şekil 7.21, Şekil 7.24, Şekil 7.27 ve Şekil 7.30'da verilmiştir.

$470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen en yüksek voltaj 12.5 V'tur ve bu voltaj, 0.34 g'lık uç kütlesine sahip transdüser ile üretilmiştir.

Sırasıyla 0.17 g, 0.34 g, 0.51 g, 0.68 uç kütlesine sahip B-PZT1 transdüserine bağlanmış olan  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan elektriksel yük değerleri, yine sırasıyla, Şekil 7.22, Şekil 7.25, Şekil 7.28 ve Şekil 7.31'da verilmiştir.

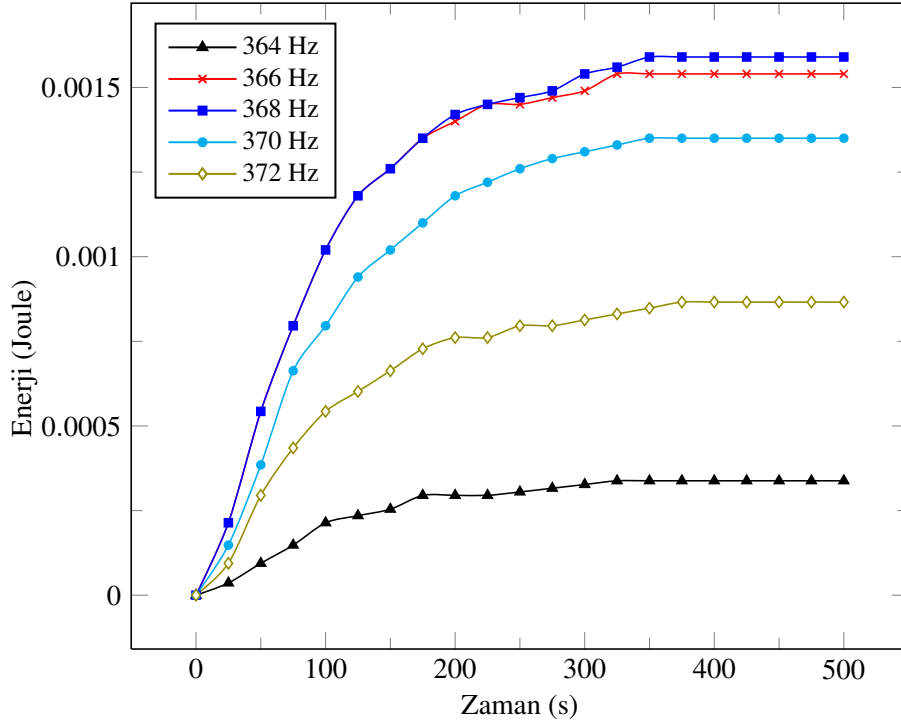
$470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltaj değerleri yardımıyla ve Eşitlik 7.1 kullanılarak hesaplanan en yüksek yük değeri  $5.9 \times 10^{-3}$  Coulomb'dur ve 0.34 g'lık uç kütlesine sahip transdüser ile üretilmiştir.



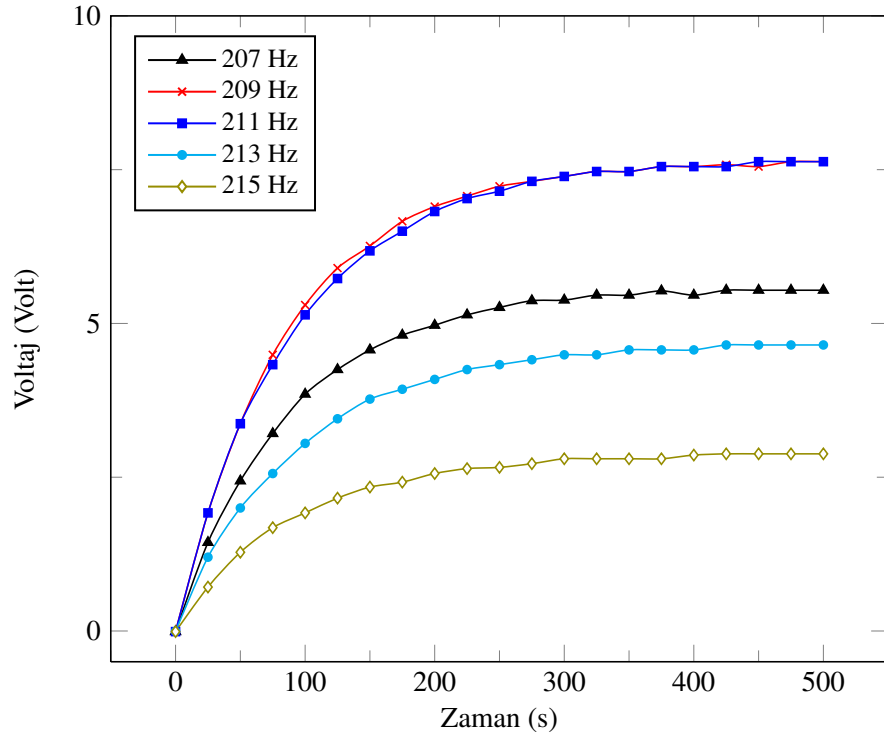
**Şekil 7.19:** Uç kütlesi olmayan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi

Sırasıyla 0.17 g, 0.34 g, 0.51 g, 0.68 uç kütlesine sahip B-PZT1 transdüserine bağlanmış olan  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerji miktarı, yine sırasıyla, Şekil 7.23, Şekil 7.26, Şekil 7.29 ve Şekil 7.32'da verilmiştir.

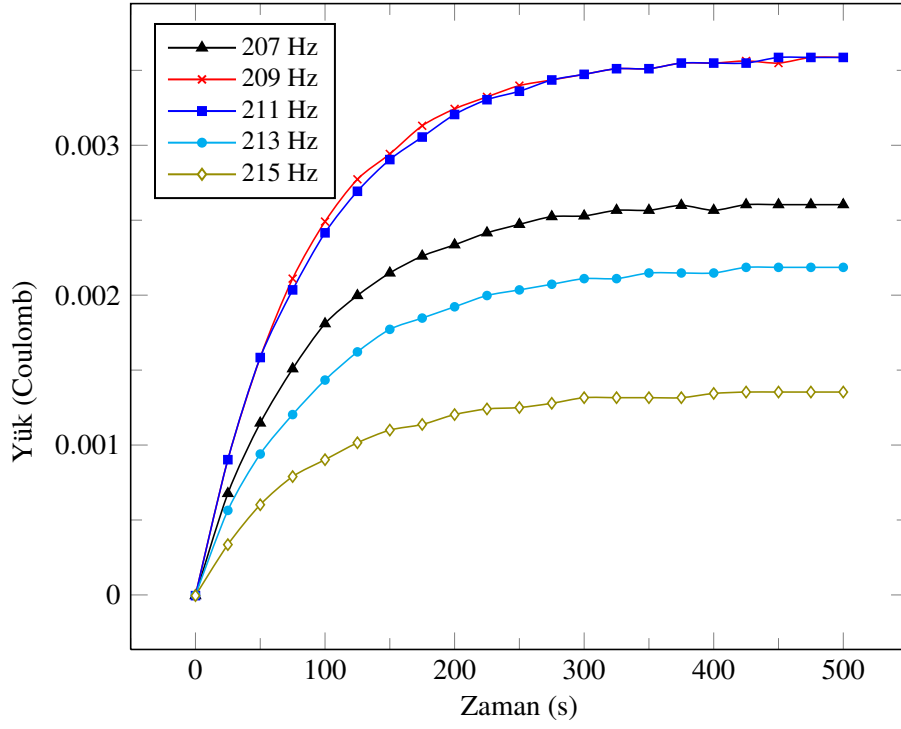
$470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltaj değerleri yardımıyla ve Eşitlik 7.2 kullanılarak hesaplanan en yüksek enerji değeri  $3.5 \times 10^{-3}$  Joule'dür ve 0.34 g'lık uç kütlesine sahip transdüser ile üretilmiştir.



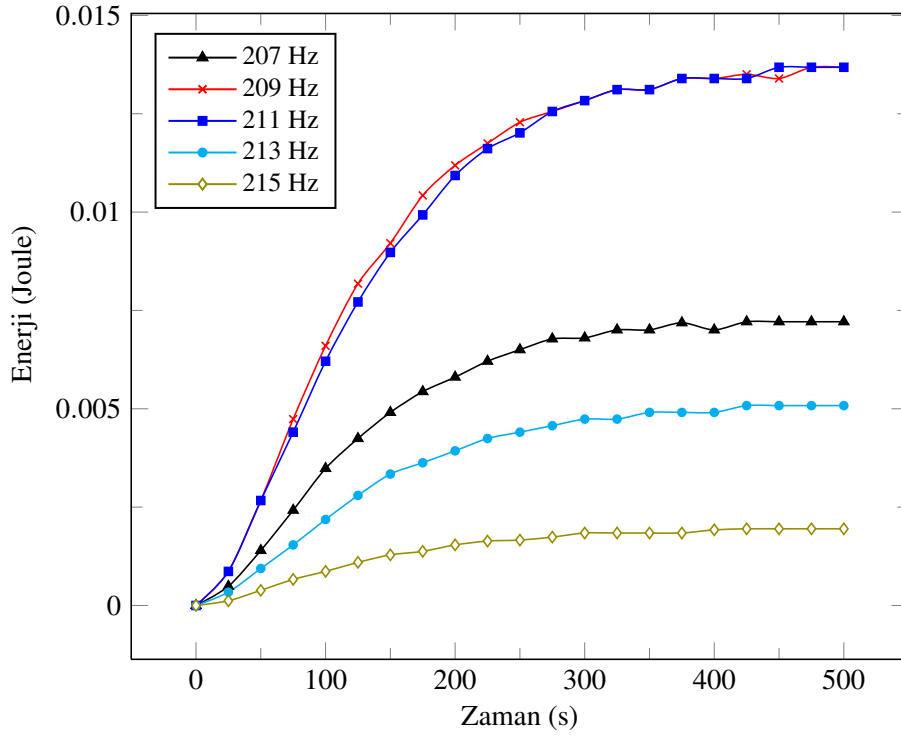
**Şekil 7.20:** Uç kütlesi olmayan B-PZT1 transdüsereine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi



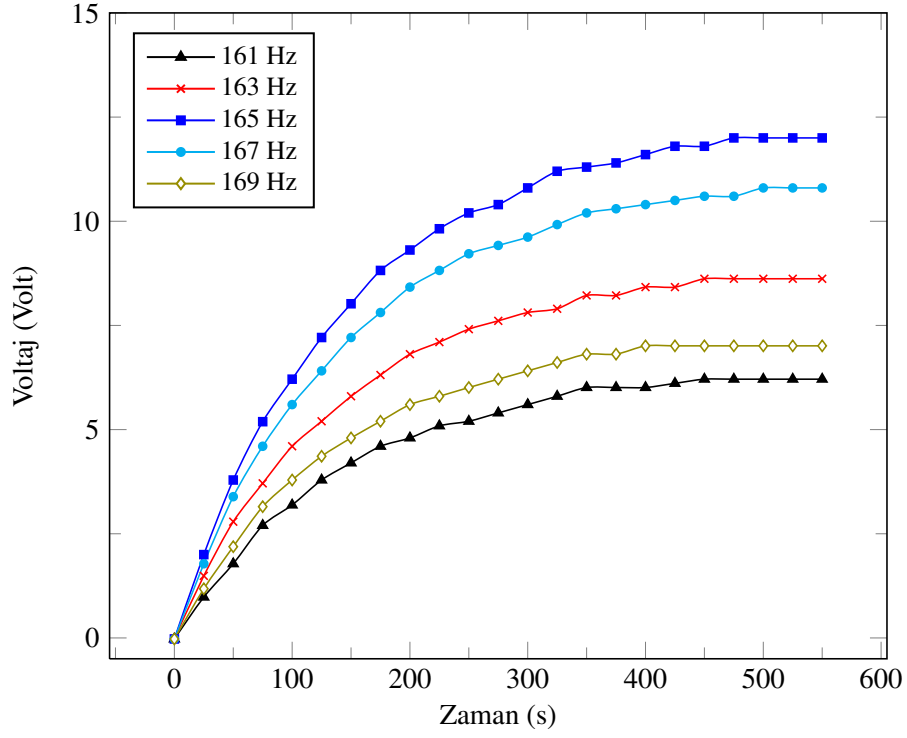
**Şekil 7.21:** 0.17 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüsereine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi



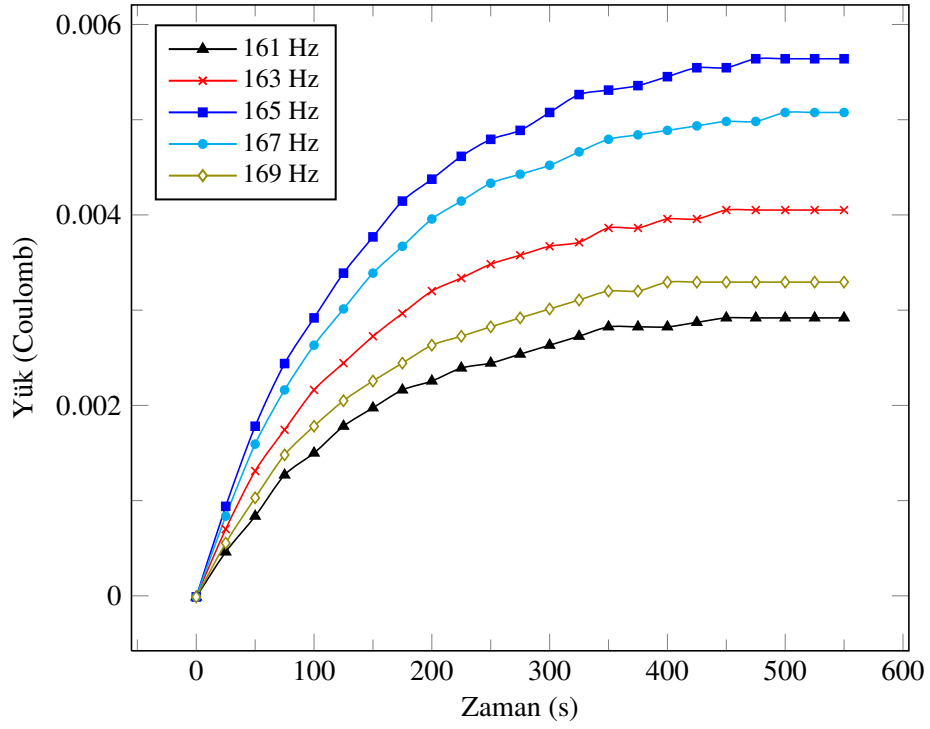
**Şekil 7.22:** 0.17 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi



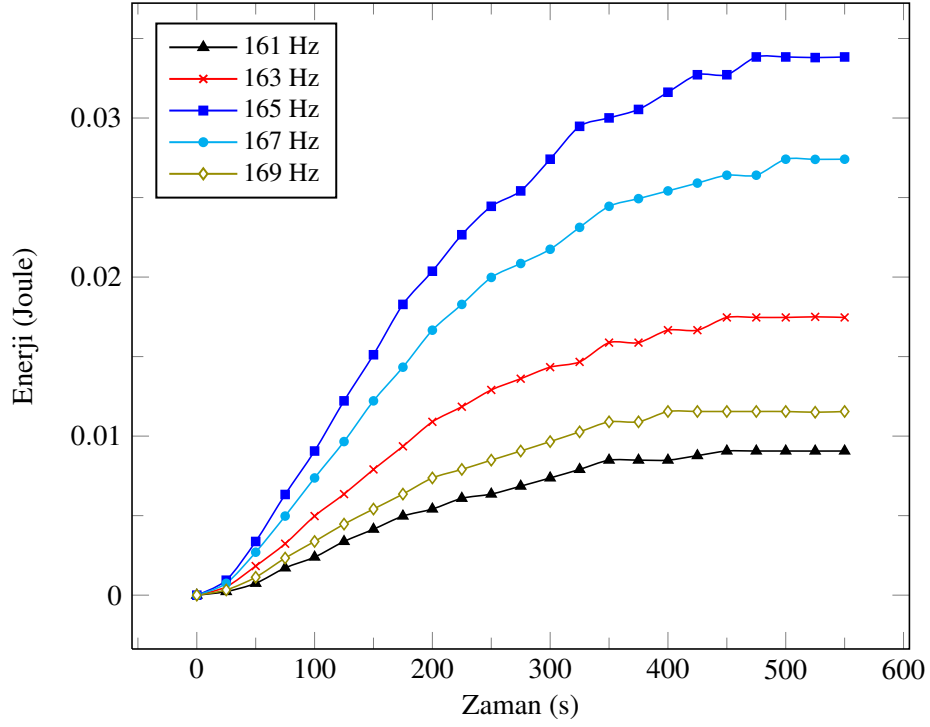
**Şekil 7.23:** 0.17 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi



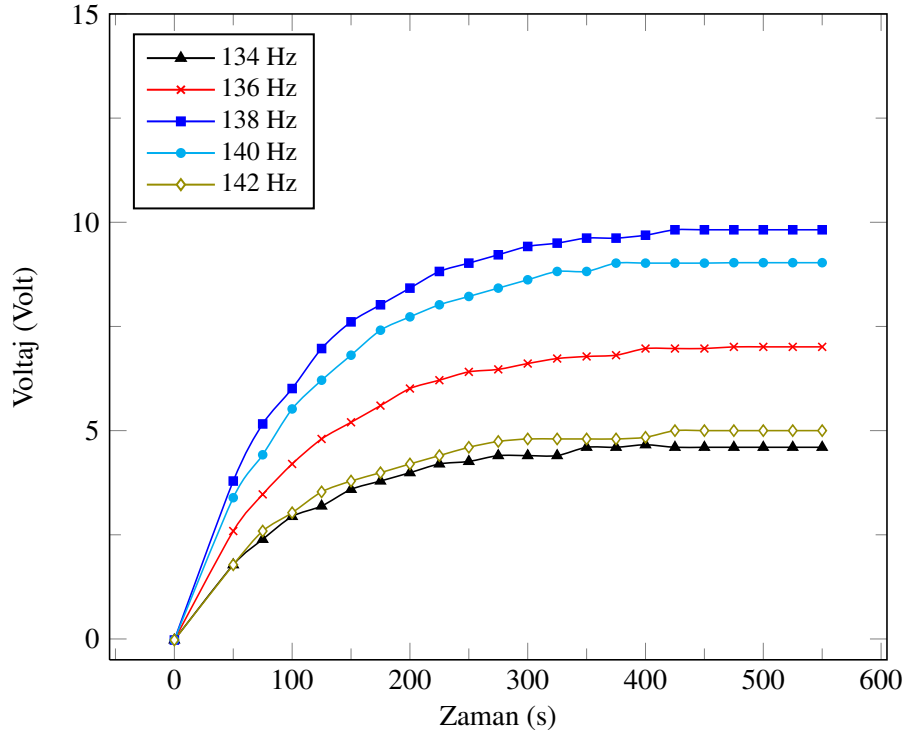
**Şekil 7.24:** 0.34 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi



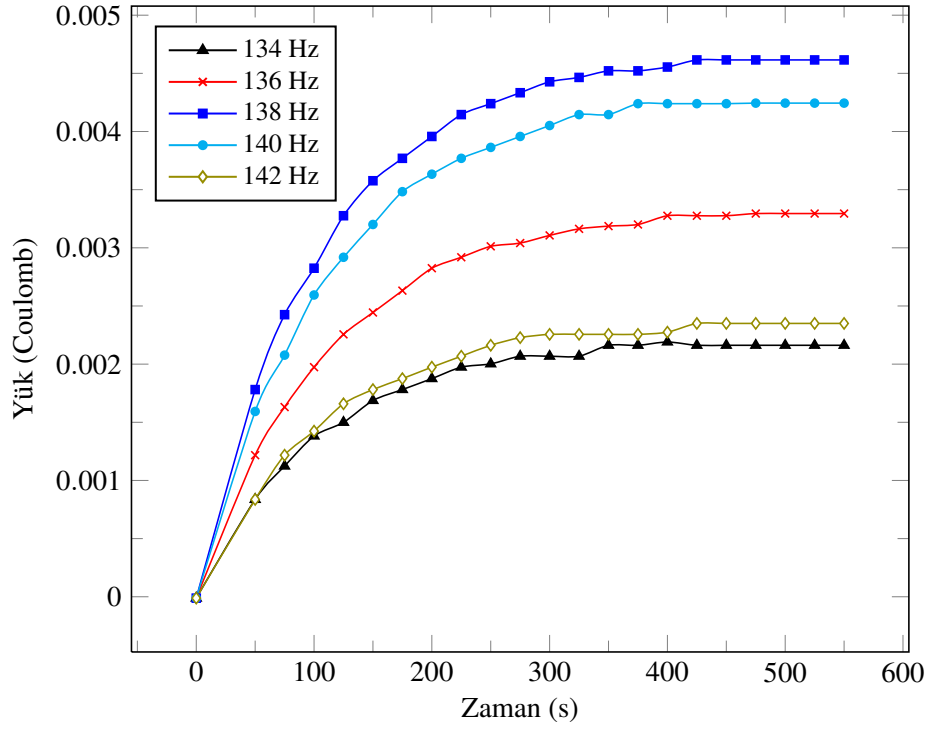
**Şekil 7.25:** 0.34 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi



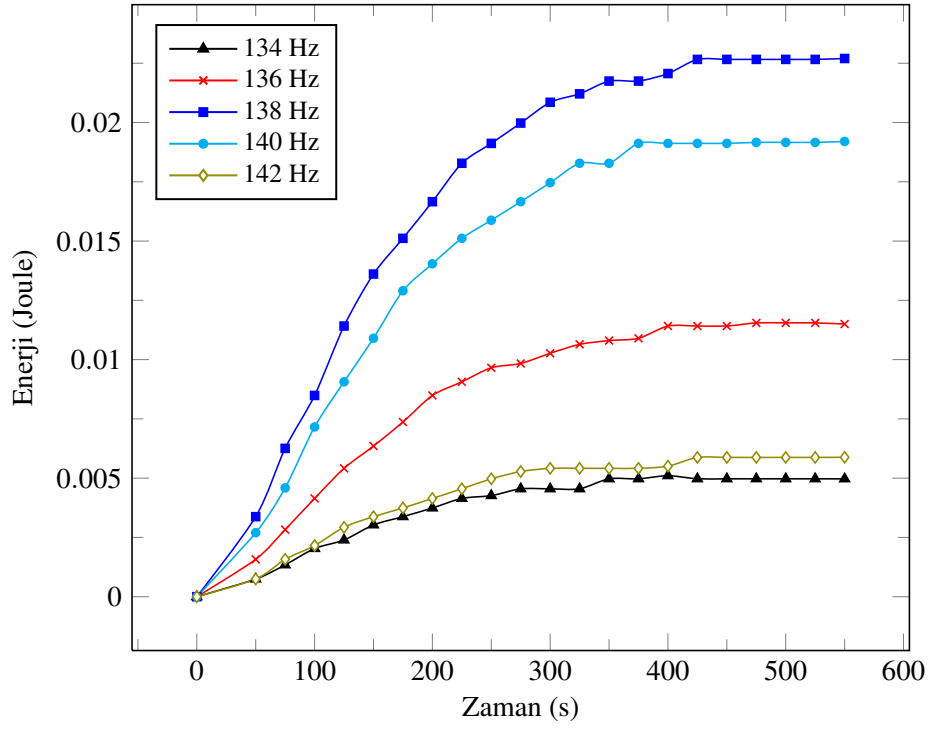
**Şekil 7.26:** 0.34 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi



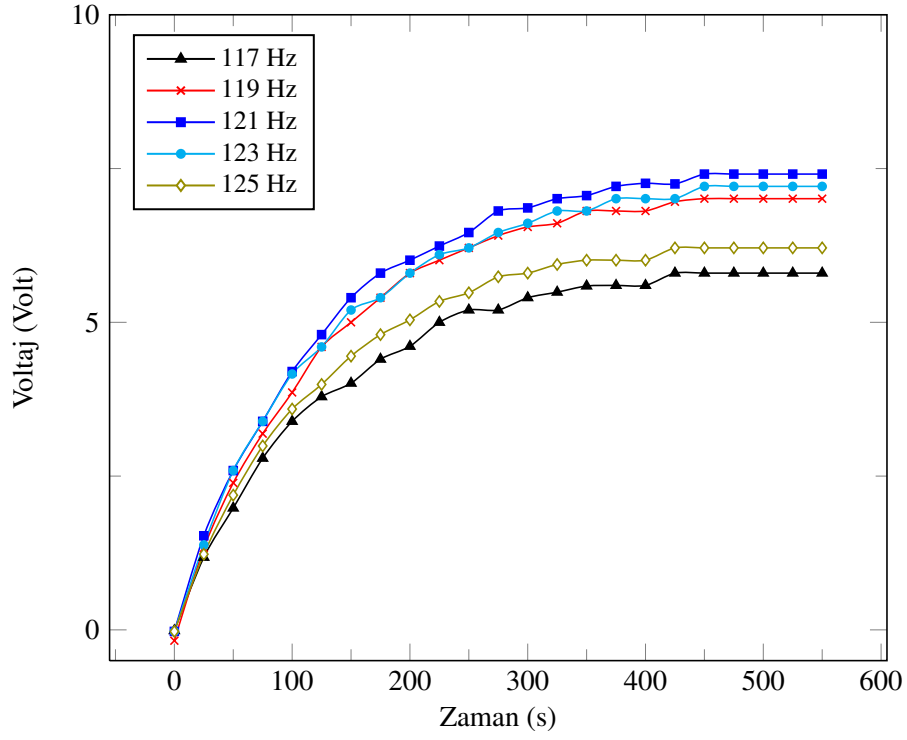
**Şekil 7.27:** 0.51 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi



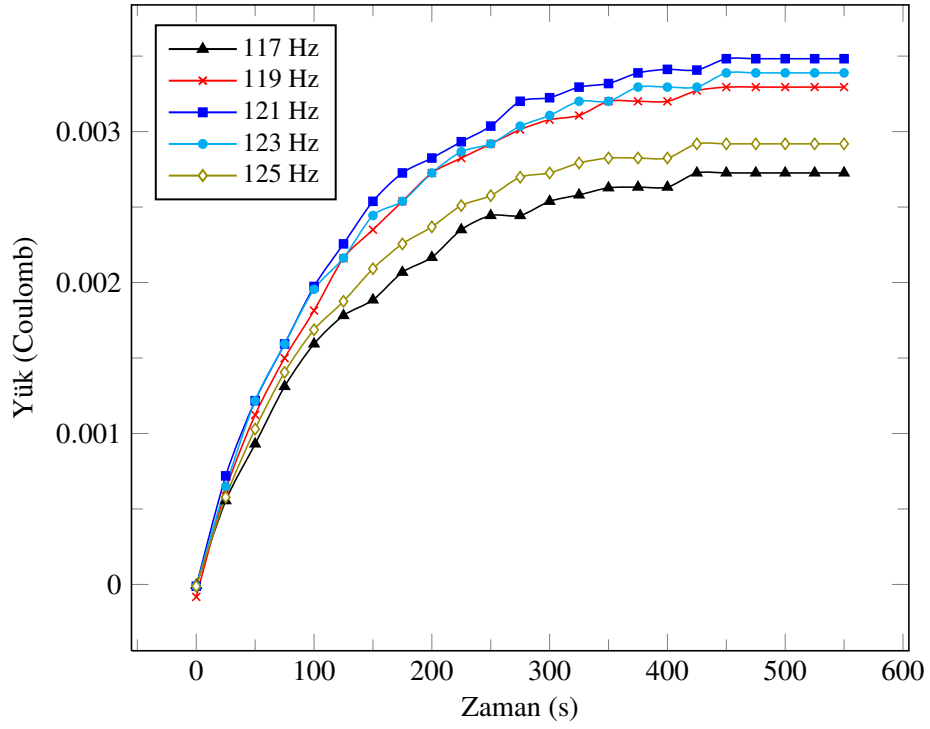
**Şekil 7.28:** 0.51 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi



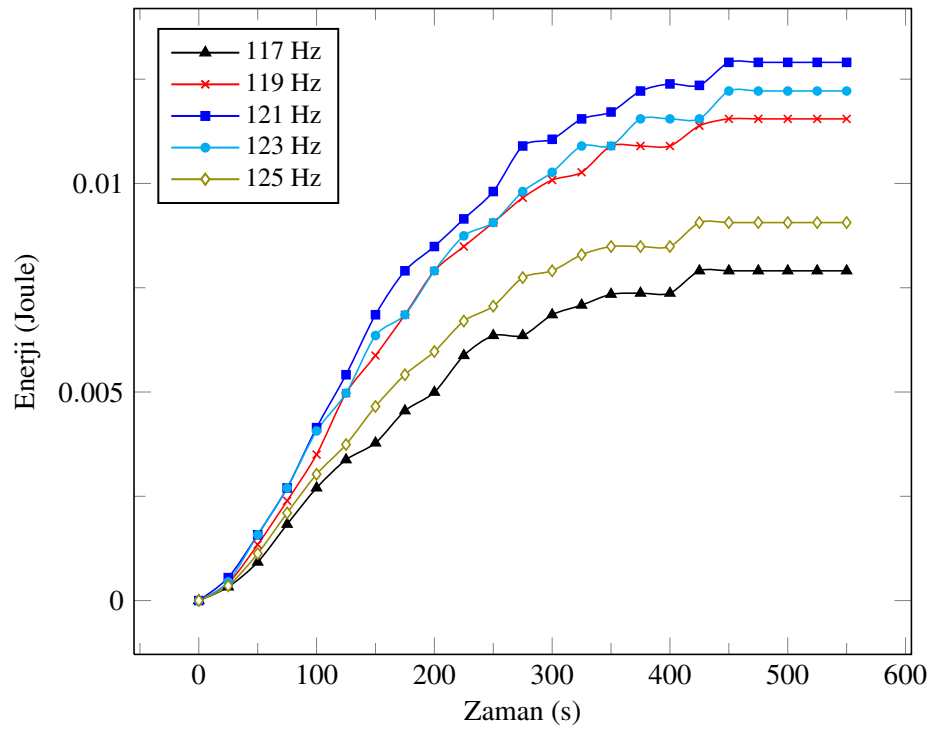
**Şekil 7.29:** 0.51 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi



**Şekil 7.30:** 0.68 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinden ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi



**Şekil 7.31:** 0.68 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan yükün zamana bağlı değişimi



**Şekil 7.32:** 0.68 g'lık uç kütlesi olan B-PZT1 transdüserine bağlanmış  $470\mu F$ 'lık kapasitör üzerinde depolanan enerjinin zamana bağlı değişimi

Lityum-iyon pillerin içerisindeki lityum iyonlarını anot ve katot arasındaki jel polimer elektrottan ve ayırıcıdan geçirebilmek için ihtiyaç duyulan belirli bir en düşük voltaj değerinin bulunmaktadır. Birçok pilde bu en düşük voltaj değeri 3.7 V'tur. Dolayısıyla ancak 3.7 V'u aşan bir voltaj değeriyle bu pillerin doldurulması mümkün olacaktır. Bu çalışmada kullanılan enerji hasatı üniteleri ile elde edilen voltaj değerleri bu enerjinin lityum-iyon piller üzerinde depolanmasına izin vermemektedir.

## 8. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tezin amacı zil tipi transdüser esaslı piezoelektrik enerji hasatı ünitelerinin enerji hasatı performanslarını değerlendirmektir. Sözü geçen ünitelerin tasarım kriterleri irdelenmiştir. Bu kriterler transdüserde kullanılan piezoelektrik malzemenin cinsi ve ünitenin geometrik ölçüleridir.

### 8.1 Üretilen piezoelektrik seramik kompozisyonlarının değerlendirilmesi

$Pb[(Zr_xTi_{1-x})O_3]_{0.9}\{[(Zn_{0.8}Ni_{0.2})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3\}_{0.1} + 0.5 \text{ wt } \% MnO_2$  genel formülüne sahip ve  $x$  değeri 0.51 ile 0.54 arasında değişen piezoelektrik seramik kompozisyonları karışık oksit yöntemi ve kolumbit prekürsör yöntemi gibi mekano-kimyasal üretim yöntemleri ile üretilmiştir. Kompozisyonlar daha sonra yapıda mevcut fazlar, mikroyapı, dielektrik ve piezoelektrik özellikler açısından incelenmiştir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip piezoelektrik seramik kompozisyonları için en önemli performans katsayısı piezoelektrik yük sabitesi ile ( $d_{ij}$ ) piezoelektrik voltaj sabitesinin ( $g_{ij}$ ) çarpımından elde edilen *dönüştürme oranıdır*.

Tane boyutu  $d < 2.5 \mu m$  olacak şekilde nispeten düşük sinterleme sıcaklıkları ( $< 1050 \text{ }^\circ C$ ) için piezoelektrik yük sabitesi  $d_{33}$ 'ün sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte ani bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek  $d_{33}$  sabiti  $1050 \text{ }^\circ C$  sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenerek üretilen numunelerde ( $d = 2.5 - 4.5 \mu m$ ) görülmüştür. Dielektrik sabitesi sinterleme sıcaklığı arttıkça artmaktadır. Düşük sinterleme sıcaklıkları için piezoelektrik voltaj sabitesi ( $g_{33}$ ) artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte artış göstermekte ve  $1050 \text{ }^\circ C$ 'lik sinterleme sıcaklığında en yüksek değerine ulaşmaktadır.

Sonuç olarak en yüksek  $d_{33}.g_{33}$  çarpımı yani *dönüştürme oranı*,  $1050 \text{ }^\circ C$  sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş ve Zr/Ti oranı 52/48 olan seramik kompozisyonları ile elde edilmiş ve  $15.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$  değerine ulaşılmıştır.

## 8.2 Enerji hasatı ünitesinin incelenmesi

Yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik seramik kompozisyonları ve ticari yumuşak PZT kompozisyonları kullanılarak üretilmiş olan zil tipi transdüserler değişen frekanslar, ön gerilmeler ve ilave ağırlıklarla titreşim deneylerine tabi tutulmuş ve enerji hasatı performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki farklı malzemeler kullanılarak üretilen zil tipi transdüserler son derece farklı özellikler sergilemektedir. İlave ağırlık ve ön gerilme de transdüserlerin enerji hasatı karakteristiklerini etkileyen diğer önemli etkenlerdir.

Sonuçlar göstermektedir ki farklı elektro-aktif malzemeler kullanılarak üretilen zil tipi transdüserlerin enerji hasatı karakteristikleri tamamen farklı olmaktadır. Sisteme eklenen ağırlık ve uygulanan mekanik ön-gerilme de sistemin davranışını etkileyen diğer önemli parametrelerdir.

Rezonans frekansı sisteme ilave edilen ağırlıkla önemli ölçüde değişmektedir. Transdüserlerde kullanılan elektro-aktif malzemenin cinsi de sistemin rezonans frekansı üzerinde etkiye sahiptir.

C-PZT1 transdüserinin rezonans frekansı diğer transdüserlerden yüksektir. C-PZT2 transdüserin düşük rezonans frekansının, tabakalı disk yapısını oluşturmak amacıyla iki seramik disk arasında kullanılan iletken metalik tabakadan kaynaklandığı düşünülmektedir. C-PZT2 transdüserin rezonans frekansı uygulanan ön gerilme ile değişiklik göstermektedir. Ancak bu değişim herhangi bir düzenli kalıp sergilememektedir. Dolayısıyla bu veriler ışığında ön gerilmenin rezonans frekansına etkisi konusunda bir kanıya varmak mümkün değildir. En düşük rezonans frekansı C-PZNN1 transdüserininki olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun sebebi PZT 5H seramiklerin katılığının PZNN-PZT seramiklerinden daha yüksek olması şeklinde açıklanabilir.

Elektriksel empedans, önemli ölçüde transdüserde kullanılan piezoelektrik malzemeye bağlı olarak değişmektedir. İlave ağırlık ya da mekanik ön-gerilme, elektriksel empedans üzerinde bir etkiye sahip değildir. Sistemden en fazla miktarda güç çekebilmek için enerji hasatı ünitesi ile üniteye bağlanacak olan elektronik devrenin elektriksel empedanslarının eşit olması gerekmektedir. Eğer

enerji hasatı ünitesinin empedansı elektronik devrenin empedansından daha fazla olursa kayıplar artacak ve dolayısıyla depolanabilecek enerji miktarı azalacaktır. Diğer taraftan eğer devrenin empedansı daha yüksek olduğunda daha yüksek oranda güç, kaynaktan elektriksel yüke doğru aktarılacak ve dolayısıyla enerji aktarım verimi artacaktır; ancak toplam direnç arttığından dolayı aktarılan enerji yine de azalacaktır.

Piezoelektrik transdüserler rezonans frekanslarından çok daha düşük frekanslarda çalıştırıldıklarında büyük orandan kapasitif davranış gösterirler. Piezoelektrik seramiklerin kapasitansı arttıkça da elektriksel empedansı azalmaktadır. Enerji hasatı uygulamalarında da piezoelektrik seramikler genellikle rezonans frekanslarının altında frekanslarda titreştirilirler. C-PZT2 transdüserin elektriksel empedansı diğer transdüserlere göre daha düşüktür. İnce piezoelektrik seramik tabakalarını bir araya getirerek tabakalı yapılar oluşturmak yapının kapasitansını arttırdığından dolayı empedansını düşürmektedir. C-PZNN1 transdüserinin elektriksel empedansı bu çalışmada kullanılan diğer transdüserlerden yüksektir. Bu da elektriksel empedans uyumunu sağlayabilmek için enerji hasatı devresinin daha yüksek empedansa sahip olması gerektiğini göstermektedir. Daha ince tabakalı PZNN-PZT seramik disklerini tabakalı yapılar oluşturacak şekilde kullanmak elektriksel empedansı azaltmak açısından faydalı olacaktır.

Sistemin ürettiği voltaj transdüserde kullanılan malzemenin cinsine, piezoelektrik seramik tabaka sayısına, ön-gerilmeye ve rezonans frekansına bağlı olarak değişmektedir. En yüksek voltaj (4170 mV) C-PZNN1 transdüseri ile ve 100 k $\Omega$  elektriksel yük üzerinde ölçülmüştür. C-PZT1 transdüseri ise 15 k $\Omega$  direnç üzerinde 1150 mV voltaj oluşturmuştur. Seramik kalınlığı, uygulanan kuvvete dik olan yüzey alanı ve transdüserin  $g_{33}$  değeri, üretilen voltaj için önemli parametrelerin başında gelmektedir. Bu çalışmada üretilmiş olan PZNN-PZT seramiklerinin  $g_{33}$  katsayısı 0.055 V/mN, PZT 5H seramiklerinin ise 0.019 V/mN'dur. Arada 4 kata yakın fark bulunmaktadır. C-PZT2 transdüseri en düşük voltajı üretmektedir ancak ürettiği güç miktarı C-PZT1 transdüserinden daha fazladır. Dolayısıyla anlaşılmaktadır ki en yüksek miktarda güç üretebilmesi için transdüserin en yüksek voltajı üretmesi gerekli değildir. İnce seramik disk tabakaları daha düşük voltaj

üretecektir, ancak transdüserin artan kapasitansı elektronik devreye iletilebilen gücün oranının artmasını sağlayacaktır.

Ölçülen akım değerleri malzeme özellikleri ve piezoelektrik seramik tabaka sayısına bağlı olarak değişmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan transdüserler içerisinde en yüksek akımı üreten transdüser C-PZT2 transdüseridir. C-PZT2 transdüseri 4 k $\Omega$  direnç üzerinden 205.4  $\mu$ A akım geçirmektedir. C-PZT2'nin düşük empedansı ile eşleşen elektriksel yükün de düşük empedanslı olması, yüksek akım miktarının sebebidir. En düşük akım miktarı ise 100 k $\Omega$  direnç üzerinden ölçülmüş ve C-PZNN1 transdüseri ile üretilmiştir. Bu transdüserin çok yüksek empedansa sahip olması ölçülen düşük akımında sebebidir.

Tüm bunlara bağlı olarak üretilen güç miktarı da transdüserde kullanılan malzemeye ve piezoelektrik seramik tabaka sayısına bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen güç aynı zamanda titreşimin frekansına ve mekanik ön-gerilmeye de önemli derecede bağlıdır. Enerji hasatı ünitesi ile elektronik devre arasındaki empedans uyumu da sistemin performansı üzerinde son derece etkilidir. En yüksek güç rezonans frekansında elde edilmektedir. Ön gerilme arttıkça üretilen güç azalmaktadır. C-PZNN1 transdüseri 177  $\mu$ W güç üretirken C-PZT2 transdüseri 167.4  $\mu$ W, C-PZT1 transdüseri ise 89.5  $\mu$ W güç üretmiştir.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki ince tabakalardan oluşan tabakalı yapılar, tek tabakalı kalın seramiklere göre daha fazla enerji üretmektedir. Bu, tabakalı yapıların empedanslarının düşük olması sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

PZNN-PZT seramik kompozisyonları enerji hasatı uygulamaları açısından gelecek vaad eden kompozisyonlardır. C-PZNN1 transdüseri tarafından üretilen enerji C-PZT1 transdüseri tarafından üretilen enerjinin iki katıdır.

Empedans eşleştirme enerji hasatı uygulamalarında çok büyük önem arz etmektedir. En yüksek güç, elektriksel yükün empedansı ile üretici empedansı eşleştiğinde elde edilmektedir.

Transdüserin elektriksel empedansı ne kadar düşük olursa enerji hasatı ünitesinin elektronik devrelere entegrasyonu da o kadar kolay olacaktır.

Piezoelektrik enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansını azaltabilmek amacıyla iki adet zil tipi transdüser ve ucunda ağırlık bulunan bir ankastre çubuktan oluşan farklı bir enerji hasatı ünitesi tasarlanmıştır.

Sistemin rezonans frekansının 200 Hz'i geçmeyeceği şekilde belirlenen tasarım kısıtına uyacak şekilde parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Euler-Bernoulli çubuk teorisine dayanarak bir matematiksel model oluşturulmuş ve tasarım parametrelerinin rezonans frekansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna ilave olarak bir de sonlu elemanlar yöntemi çalışması yapılarak enerji hasatı ünitesinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Türetilen matematiksel model ile sonlu elemanlar modeli, deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sınanmıştır.

Yapılan karşılaştırmalar sonucu matematiksel model, sonlu elemanlar analizi ve deneysel veriler arasında uyum olduğu belirlenmiştir. Burada incelenen sistemin ölçüleri ve kullanılan malzemeler önceden seçilmiş malzemeler olduğu halde, türetilen matematiksel model ya da sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı malzeme ve ölçülerde ancak benzer geometrilerdeki sistemlerin rezonans frekansları da öngörülebilecektir.

2 g ( $1g = 10m/s^2$ )'lik ivme genliği için DC voltajı ve üretilen güç, deneysel olarak ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Piezoelektrik seramik diskleri tabakalı yapılar halinde kullanmanın enerji hasatı uygulamaları açısından etkileri de değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

Ankastre çubuğun boyu arttıkça rezonans frekansı azalmaktadır. 200 Hz'lik frekans 40 mm uzunlukta ve 0.5 mm kalınlıkta çubuğun ucuna eklenen 0.17 g'lık ağırlık ile kolayca elde edilmektedir. En yüksek güç miktarı transdüserlerde kullanılan malzemenin cinsinden bağımsız olarak 0.34 g'lık uç kütlesi eklenerek elde edilmiştir.

Enerji hasatı ünitesinin rezonans frekansı bulunduğu ortamdaki titreşimin frekansıyla örtüşecek şekilde önceden tasarımlanabilmektedir. Enerji hasatı ünitesini tamamlayan elektronik devrenin elektriksel direnci arttıkça elde edilen güç hızlı bir miktarda artmakta, empedans uyumunun yakalandığı belli bir en yüksek

değerden sonra da azalmaya başlamaktadır. Tabakalı yapı oluşturularak kullanılan transdüserlerin elektriksel empedansları tek tabakalı yapılara göre daha düşüktür. Tabakalı yapıya sahip transdüserler aynı zamanda tek tabakalı yapılara göre daha yüksek miktarda güç üretmektedir. B-PZT2 yapısı 153 Hz’te 141.61  $\mu W$  güç üretirken B-PZT1 yapısı 166 Hz frekansta 104.04  $\mu W$  güç üretmektedir.

### 8.3 Gelecekteki çalışmalar için öneriler

Bu çalışmada sunulan ankastre çubuk şeklindeki piezoelektrik enerji hasatı ünitesi geniş frekans bandında çalışacak sistemlerin geliştirilmesine uygun yapıdadır. Farklı uzunluktaki ve farklı uç ağırlıklarına sahip ankastre çubuklardan oluşan ünitelerin bir araya getirilmesiyle geniş frekans bandında çalışabilecek sistemler üretilebilecektir.

Tabakalı yapıdaki seramik diskleri kullanmanın faydaları bu çalışmada ortaya konmuştur. Yüksek enerji yoğunluklu piezoelektrik seramik kompozisyonlarının da yüksek  $d_{ij}, g_{ij}$  değerlerinden dolayı enerji hasatı uygulamaları için gelecek vaad eden kompozisyonlar olduğu görülmüştür. Dolayısıyla PZNN-PZT kompozisyonları ile üretilecek çok tabakalı yapıların enerji hasatı uygulamaları açısından yeni çalışmalara yol açacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Paradiso, J. and Starner, T., *Energy scavenging for mobile and wireless electronics*, IEEE Pervasive Computing, **4**, 18–27 (2005).
- [2] Minazara, E., Vasic, D., Costa, F., Poulin, G. *Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting*, Ultrasonics, **44**, Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU) (2006).
- [3] Hande, A., Polk, T., Walker, W. and Bhatia, D. *Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes*, Microprocessors and Microsystems, **31** (6), 420 – 432 (2007).
- [4] Yu, H. and Yue, Q. *Indoor Light Energy Harvesting System for Energy-Aware Wireless Sensor Node*, Energy Procedia, **16**, 1027 – 1032 (2012).
- [5] Fei, F., Mai, J.D. and Li, W.J. *A wind-flutter energy converter for powering wireless sensors*, Sensors and Actuators A: Physical, **173** (1), 163 – 171 (2012).
- [6] Kim, S.H., Ji, C.H., Galle, P., Herrault, F., Wu, X., Lee, J.H., Choi, C.A. and Allen, M.G.. *An electromagnetic energy scavenger from direct airflow*, Journal of Micromechanics and Microengineering, **19** (9), 094010 (2009).
- [7] He, X.F. and Gao, J. *Wind energy harvesting based on flow-induced-vibration and impact*, Microelectronic Engineering, **111**, 82 – 86 (2013).
- [8] Karami, M.A., Farmer, J.R. and Inman, D.J. *Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine*, Renewable Energy, **50**, 977 – 987 (2013).
- [9] Huesgen, T., Woias, P. and Kockmann, N. *Design and fabrication of MEMS thermoelectric generators with high temperature efficiency*, Sensors and Actuators A: Physical, **145–146**, 423 – 429 (2008)
- [10] Dalol, S. and Ferrari, V. *Design and fabrication of a novel MEMS thermoelectric generator*, Procedia Engineering, **25**, 207 – 210 (2011).
- [11] Dávila, D., Tarancón, A., Calaza, C., Salleras, M., Fernández-Regúlez, M., Paulo, A.S. and Fonseca, L. *Monolithically integrated thermoelectric energy harvester based on silicon nanowire arrays for powering micro/nanodevices*, Nano Energy, **1**(6), 812 – 819 (2012).
- [12] Sodano, H.A., Simmers, G.E., Dereux, R. and Inman, D.J. *Recharging Batteries using Energy Harvested from Thermal Gradients*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, **18**(1), 3–10 (2007).
- [13] Wang, L. and Yuan, F.G. *Vibration energy harvesting by magnetostrictive material*, Smart Materials and Structures, **17**(4), 045009 (2008).
- [14] Peano, F. and Tambosso, T. *Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger*, Microelectromechanical Systems, Journal of, **14**(3), 429–435 (2005).
- [15] Beeby, S.P., Torah, R.N., Tudor, M.J., Glynne-Jones, P., O'Donnell, T., Saha, C.R. and Roy, S. *A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting*, Journal of Micromechanics and Microengineering, **17**(7), 1257 (2007).

- [16] Glynne-Jones, P., Tudor, M., Beeby, S. and White, N. *An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems*, Sensors and Actuators A, **110**(1-3), 344–349 (2004).
- [17] Saha, C., O'Donnell, T., Wang, N. and McCloskey, P. *Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion*, Sensors and Actuators A: Physical, **147**(1), 248 – 253 (2008).
- [18] Soliman, M.S.M., Abdel-Rahman, E.M., El-Saadany, E.F. and Mansour, R.R. *A wideband vibration-based energy harvester*, Journal of Micromechanics and Microengineering, **18**(11), 115021 (2008).
- [19] Sodano, H.A., Inman, D.J. and Park, G. *Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, **16**(10), 799–807 (2005).
- [20] Kim, H., Batra, A., Priya, S., Uchino, K., Markley, D., Newnham, R.E. and Hofmann, H.F. *Energy Harvesting Using a Piezoelectric "Cymbal" Transducer in Dynamic Environment*, Japanese Journal of Applied Physics, **43**(9A), 6178–6183 (2004).
- [21] Song, H., Choi, Y., Wang, G. and Wereley, N. *Energy Harvesting Utilizing Single Crystal PMN-PT Material and Application to a Self-Powered Accelerometer*, J. Mech. Des., **131**(9), 091008–8 (2009).
- [22] Roundy, S., Wright, P.K. and Rabaey, J. *A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes*, Computer Communications, **26**(11), 1131–1144 (2003).
- [23] Kim, S.G., Priya, S. and Kanno, I. *Piezoelectric MEMS for energy harvesting*, MRS Bulletin, **37**, 1039 – 1050 (2012)
- [24] Piersol, A. and Paez, T. *Harris' Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill handbooks, McGraw-hill (2009).
- [25] Williams, C. and Yates, R. *Analysis Of A Micro-electric Generator For Microsystems*, Sensors and Actuators A: Physical, **52**(1–3), 8 – 11 (1996).
- [26] El-hami, M., Glynne-Jones, P., White, N., Hill, M., Beeby, S., James, E., Brown, A., Ross, J. *Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator*, Sensors and Actuators A: Physical, **92** (1-3), 335 – 342 (2001).
- [27] Stephen, N. *On energy harvesting from ambient vibration*, Journal of Sound and Vibration, **293**(1-2), 409–425 (2006).
- [28] Guyomar, D., Badel, A., Lefeuvre, E. and Richard, C. *Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, **52**(4), 584–595 (2005).
- [29] Shu, Y.C., Lien, I.C. *Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems*, Smart Materials And Structures, **15**(6), 1499–1512 (2006).
- [30] Shu, Y.C. and Lien, I.C. *Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system*, Journal of Micromechanics and Microengineering, **16**(11), 2429 (2006).

- [31] Mitcheson, P., Green, T., Yeatman, E. and Holmes, A. *Architectures for vibration-driven micropower generators*, Journal of Microelectromechanical Systems, **13**(3), 429–440 (2004).
- [32] duToit, N.E., Wardle, B.L. and Kim, S.G. *Design Considerations For MEMS-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters*, Journal of Integrated Ferroelectrics, **71**(1), 121–160 (2005).
- [33] Beeby, S.P., Tudor, M.J. and White, N.M. *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*, Measurement Science and Technology, **17**(12), R175 (2006).
- [34] Lefeuvre, E., Sebald, G., Guyomar, D., Lallart, M. and Richard, C. *Materials, structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting*, Journal of electroceramics, **22**(1), 171–179 (2009).
- [35] Roundy, S. and Wright, P.K. *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics*, Smart Materials and Structures, **13**(5), 1131 (2004).
- [36] Chalasani, S. and Conrad, J. *A survey of energy harvesting sources for embedded systems*, IEEE Southeastcon, 442–447 (2008).
- [37] Meninger, S., Mur-Miranda, J., Amirtharajah, R., Chandrakasan, A. and Lang, J. *Vibration-to-electric energy conversion*, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, **9**(1), 64–76 (2001).
- [38] Roundy, S. *Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion*, Phd thesis, University of California, Berkeley (2003).
- [39] Roundy, S., Wright, P. and K., P. *Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters*, Proceedings of IMECE, 1–10 (2002).
- [40] Meninger, S. *A Low Power Controller for a MEMS Based Energy Converter*, Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1999).
- [41] Despesse, G., Jager, T., Jean-Jacques, C., Léger, J.M., Vassilev, A., Basrour, S., Charlot, B. *Fabrication and characterization of high damping electrostatic micro devices for vibration energy scavenging*, Proceedings of Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS, 386–390 (2005).
- [42] Wang, P., Dai, X., Fang, D., Zhao, X. *Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator*, Microelectronics Journal, **38**(12), 1175–1180 (2007).
- [43] Sari, I., Balkan, T. and Kulah, H. *An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations*, Sensors and Actuators A: Physical, **145-146**, 405–413 (2008).
- [44] Häsler, E., Stein, L., Harbauer, G. *Implantable physiological power supply with PVDF film*, Ferroelectrics, **60**(1), 277–282 (1984).
- [45] Starner, T. *Human-powered wearable computing*, IBM Systems Journal, **35**(3-4), 618–629 (1996).
- [46] Umeda, M., Nakamura, K., Ueha, S. *Energy Storage Characteristics of a Piezo-Generator using Impact Induced Vibration*, Japanese Journal of Applied Physics, **36** (Part 1, No. 5B), 3146–3151 (1997).

- [47] Mohammadi, F., Khan, A., Cass, R.B. *Power Generation from Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Fiber Composites*, MRS Proceedings, 736 (2003).
- [48] Tang, L., Yang, Y., Soh, C. *Toward Broadband Vibration-based Energy Harvesting*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, **21**(18), 1867–1897 (2010).
- [49] Ottman, G., Hofmann, H., Bhatt, A., Lesieutre, G. *Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply*, IEEE Transactions on Power Electronics, **17**(5), 669–676 (2002).
- [50] Taylor, G., Burns, J., Kammann, S., Powers, W., Welsh, T. *The Energy Harvesting Eel: a small subsurface ocean/river power generator*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, **26**(4), 539–547 (2001).
- [51] Pobering, S., Schwesinger, N. *A Novel Hydropower Harvesting Device*, Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, 480–485 (2004).
- [52] Liu, J.Q., Fang, H.B., Xu, Z.Y., Mao, X.H., Shen, X.C., Chen, D., Liao, H., Cai, B.C. *A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting*, Microelectronics Journal, **39**(5), 802 – 806 (2008).
- [53] Roundy, S., Leland, E., Baker, J., Carleton, E., Reilly, E., Lai, E., Otis, B., Rabaey, J., Wright, P., Sundararajan, V. *Improving power output for vibration-based energy scavengers*, Pervasive Computing, **4**(1), 28–36 (2005).
- [54] Haertling, G.H. *Ferroelectric Ceramics: History and Technology*, Journal of the American Ceramic Society, **82**(4), 797–818 (1999).
- [55] Heywang, W., Lubitz, K., Wersing, W. *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*, Springer Series in Materials Science, Springer London, (2008).
- [56] APC International Ltd., <http://www.americanpiezo.com>, date cited: 15.03.2013.
- [57] The Morgan Crucible Company PLC., <http://www.morgantechnicalceramics.com>, date cited: 15.03.2013.
- [58] PI Ceramic GmbH., <http://www.piceramic.com>, date cited: 15.03.2013.
- [59] CeramTec GmbH., <http://www.ceramtec.com>, date cited: 15.03.2013.
- [60] Islam, R.A., Priya, S. *High-Energy Density Ceramic Composition in the System  $Pb(Zr,Ti)O_3-Pb[(Zn,Ni)_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$* , Journal of the American Ceramic Society, **89**(10), 3147–3156 (2006).
- [61] Kim, H., Priya, S., Stephanou, H., Uchino, K. *Consideration of Impedance Matching Techniques for Efficient Piezoelectric Energy Harvesting*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, **54**(9), 1851–1859 (2007).
- [62] Bongkarn, T., Vittayakorn, N., Rujijanagul, G. *Perovskite Phase Formation, Phase Transition and Ferroelectric Properties of PZN-based Ceramics*, NU Science Journal, **2**(1), 21–32 (2005).
- [63] Park, S.E., Shrout, T.R. *Characteristics of relaxor-based piezoelectric single crystals for ultrasonic transducers*, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, **2**, 935–942 (1996).

- [64] Zyryanov, V. *Mechanochemical synthesis, phase composition, and properties of  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ -based ferroelectric ceramics*, *Inorganic Materials*, **42**(1), 92–98 (2006).
- [65] Fan, H., Kim, H.E. *Perovskite stabilization and electromechanical properties of polycrystalline lead zinc niobate–lead zirconate titanate*, *Journal of Applied Physics*, **91**(1), 317–322 (2002).
- [66] Vittayakorn, N., Rujijanagul, G., Cann, D. *The improvement in dielectric and ferroelectric performance of PZT-PZN ceramics by thermal treatment*, *Current Applied Physics*, **7**(5), 582–585 (2007).
- [67] Zeng, X., He, X., Cheng, W., Zheng, X., Qiu, P. *Dielectric and ferroelectric properties of PZN–PZT ceramics with lanthanum doping*, *Journal of Alloys and Compounds*, **485**(1-2), 843–847 (2009).
- [68] Fan, H., Kim, H.E. *Effect of Lead Content on the Structure and Electrical Properties of  $Pb((Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.5}(Zr_{0.47}Ti_{0.53})_{0.5})O_3$  Ceramics*, *Journal of the American Ceramic Society*, **84**(3), 636–638 (2001).
- [69] Shen, D., Park, J.H., Noh, J.H., Choe, S.Y., Kim, S.H., Wickle, H.C., Kim, D.J. *Micromachined PZT cantilever based on SOI structure for low frequency vibration energy harvesting*, *Sensors and Actuators A: Physical*, **154**(1), 103 – 108 (2009).
- [70] Erturk, A., Inman, D.J. *On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **19**(11), 1311–1325 (2008).
- [71] Rao, S.S. *Vibration of Continuous Systems*, John Wiley & Sons, Inc., (2007).
- [72] Meirovitch, L. *Fundamentals of Vibrations*, Mcgraw-Hill (2001).
- [73] Timoshenko, S., Young, D.H., Weaver, W. *Vibration Problems in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., (1974).
- [74] Newnham, R.E., Dogan, A. *Metal-electroactive ceramic composite transducer, Patent US 5729077*, The Pennsylvania State University (1998).
- [75] Kim, H. *Impedance Adaptation Methods of the Piezoelectric Energy Harvesting*, Phd Thesis, The Pennsylvania State University (2006).
- [76] Almen, J., Laszlo, A. *The Uniform-Section Disk Spring*, *Transactions of ASME*, **58**, 305 (1936).
- [77] Fromm, E., Kleiner, W. *Handbook for Disc Springs*, Handbook 900 507 / 04.03, Adolf Schnorr GmbH + Co., (2003).
- [78] Kim, H., Priya, S., Uchino, K., Newnham, R. *Piezoelectric Energy Harvesting under High Pre-Stressed Cyclic Vibrations*, *Journal of Electroceramics*, **15**, 27-34 (2005).
- [79] Kong, N., Ha, D.S., Erturk, A., Inman, D.J. *Resistive Impedance Matching Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **21**(13), 1293-1302 (2010).