

**GENİŞ BANTLI VE DÜŞÜK FREKANSLI MEKANİK
TİTREŞİMLER İÇİN ESNEK PİEZOELEKTRİK ENERJİ
HASADI SİSTEMİ TASARIMI VE ÜRETİMİ**

**DESIGN AND FABRICATION OF A FLEXIBLE
PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING SYSTEM FOR
BROADBAND AND LOW-FREQUENCY MECHANICAL
VIBRATIONS**

HASAN GÖKSENİN ÇETİN

YRD. DOÇ. DR. BİLSAY SÜMER
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2015

HASAN GÖKSENİN ÇETİN' in hazırladığı “**Geniş Bantlı ve Düşük Frekanslı Mekanik Titreşimler için Esnek Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemi Tasarımı ve Üretimi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İlker Murat Koç

Başkan

.....

Yrd. Doç. Dr. Bilsay Sümer

Danışman

.....

Yrd. Doç. Dr. S. Çağlar Başlamışlı

Üye

.....

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

Prof. Dr. Fatma Sevin DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

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

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

beyan ederim.

30/09/2015

HASAN GÖKSENİN ÇETİN

Eşime ve aileme...

ÖZET

GENİŞ BANTLI VE DÜŞÜK FREKANSLI MEKANİK TİTREŞİMLER İÇİN ESNEK PİEZOELEKTRİK ENERJİ HASADI SİSTEMİ TASARIMI VE ÜRETİMİ

Hasan Göksenin ÇETİN

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bilsay SÜMER

Eylül 2015, 100 sayfa

Günümüzde küçük elektronik cihazların güç ihtiyacı için alternatif enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretim teknikleri önemli hale gelmiştir. Doğada bulunan başlıca enerji kaynakları güneş enerjisi, ısı enerjisi, rüzgâr enerjisi, akustik gürültü ve mekanik titreşimler olarak sayılabilir. Mekanik titreşimler pratik olması, çevresel koşullara bağımlı olmaması, yüksek güvenilirliğe ve uzun raf ömrüne sahip olması sebebiyle küçük elektronik cihazların enerji kaynağı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Titreşim enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan üç temel mekanizma elektromanyetik, elektrostatik ve piezoelektrik olarak sıralanmaktadır. Piezoelektrik malzemeler yüksek enerji yoğunluğu kapasitelerine sahip olması, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymaması, küçük boyutlarda üretilebilmesi ve düşük frekanslı titreşim uygulamalarına uygun olması sebebiyle titreşim tabanlı enerji hasadı sistemlerinde çoğunlukla tercih edilmektedir.

Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri genelde bir elastik katmanın iki adet piezoelektrik katman arasına sıkıştırılması ile iki örtülü kiriş yapısında üretilmektedir. Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak bir piezoelektrik polimer alt katman üzerine yerleştirilen polimer sütunlar vasıtasıyla enerjinin hasat

edilmesi amaçlanmıştır. Bu konfigürasyonda, sütunlar titreşen ana yapı üzerinde çoklu osilatörler gibi hareket etmektedir ve titreşim enerjisinin ana yapıdan emilmesini sağlamaktadır. Daha sonra sütunlarda depolanan elastik enerji, piezoelektrik alt katman üzerinde oluşan gerilme yığılmaları vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Tasarlanan yapının çoğunluğunda polimer malzeme kullanılması, enerji hasadı sisteminin esnek, hafif ve düşük yoğunluklu özelliğe sahip olmasını sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında, enerji hasadı sisteminin analitik ve nümerik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Analitik model, tek sütunlu yapının tek serbestlik dereceli modeli için serbest, harmonik ve adım tahrik titreşimleri altında incelenmiştir. Ayrıca piezoelektrik malzeme ve viskoelastik sönümlenme modelleri üzerinde çalışılmıştır. Nümerik model ise, sonlu elemanlar metodu kullanılarak tek ve çok sütunlu enerji hasadı sistemlerinin modal, harmonik ve geçiş titreşim analizleri üzerinde çalışılması amacıyla geliştirilmiştir. Analitik model ve nümerik model kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tasarlanan enerji hasadı sistemi birçok farklı konfigürasyonda (tek ve çok sütunlu yapılar) farklı üretim teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Sonrasında enerji hasadı sistemlerinin titreşim testlerinin gerçekleştirilmesi için özel bir test düzeneği kurulmuştur. Tasarlanan her bir yapının farklı harmonik taban tahrik titreşimleri altında, frekans taraması, voltaj ve güç ölçüm deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kurulan deney düzeneği kullanılarak literatürde var olan bir enerji hasadı sisteminin testleri de gerçekleştirilmiş ve test sonuçları tez kapsamında tasarlanan enerji hasadı sistemlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonunda, tasarlanan her bir sistemin güç yoğunluğu, performans katsayısı, verimi vb. özellikleri bakımından performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mekanik titreşimler, piezoelektrik, enerji harmanlama, polimer sütun

ABSTRACT

DESIGN AND FABRICATION OF A FLEXIBLE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING SYSTEM FOR BROADBAND AND LOW-FREQUENCY MECHANICAL VIBRATIONS

Hasan Göksenin ÇETİN

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bilsay SÜMER

September 2015, 100 pages

Nowadays, methods for generating electrical energy from alternative energy sources have become important for powering small electronic devices. Primary energy sources available in the environment can be listed as solar, thermal, wind, acoustic and mechanical energies. Mechanical vibrations are generally used as an energy source of such devices since they are practical, not dependent on weather conditions, have high safety and long shell life. Three principal mechanisms for transforming vibration energy into electrical energy can be listed as electromagnetic, electrostatic and piezoelectric transduction. Since piezoelectric materials have higher energy density capacities, no requirement for an external power source, producible in small sizes and are suitable for low frequency vibration applications, they are generally used in vibration based energy harvesting systems.

Piezoelectric energy harvesting systems are widely produced by sandwiching an elastic layer between two rigid piezoelectric layers which is called a bimorph structure. Unlike prior efforts, this study presents a novel piezoelectric energy harvesting system where polymer pillars stand on a piezoelectric polymer backing layer. In this configuration, polymer pillars behave like a set of oscillators on the

vibrating structure, which provide absorption of vibration energy and act as an energy sink. Then, the stored elastic energy is converted to electrical energy in the clamped boundary via stress concentration on the piezoelectric layer. Energy harvesting system designed in this study is very flexible, lightweight and has low-density, since only polymer material is used in the whole structure.

In this thesis, an analytical and numerical modeling of the energy harvesting system is developed. Analytical model is investigated for a single degree of freedom system of a single pillar structure under free, harmonic and step base excitation vibrations. Besides this, piezoelectric material and viscoelastic damping models are also studied. Then, numerical modeling with finite element methods is performed to study the modal, harmonic and transient vibration analysis of the single and multiple pillar structures. Results from the vibration analyses of analytical and numerical models are also compared.

The energy harvesting system is obtained for the single and multiple pillar structures using a combination of a soft molding and additive manufacturing techniques. Then, a special test setup is prepared in order to perform vibration tests of the energy harvesting system. Each structure is tested under different harmonic base excitation vibrations including frequency sweep, voltage and power measurement tests. Results are also compared with the numerical simulation results. In addition to these, a commercial energy harvesting system is also tested using the same test setup and results are compared with the energy harvesting systems designed in this thesis. Finally, energy harvesting systems designed in this study are also compared according to their power density, figure of merit, efficiency etc.

Keywords: Mechanical vibrations, piezoelectric, energy harvesting, polymer pillar

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli katkı ve eleştiriyile bana yol gösteren ve sonsuz bir sabırla beni çalışmaya ve öğrenmeye teşvik eden tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Bilsay SÜMER'e,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman bana destek olan değerli hocam Doç. Dr. Benat KOÇKAR'a, Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ndeki diğer bütün akademisyenlere ve eğitim / öğretim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm öğretmenlerime,

Tez dönemim boyunca her zaman bana destek olan ve tez çalışmamı bitirmem için beni sabırla teşvik eden değerli ekip liderim Yankı ÇELEBİ'ye, karşılaştığım her problemde tecrübesi, bilgisi ve tavsiyeleri ile bana yol gösteren ve destek olan değerli çalışma arkadaşım Gökhan ÖZTÜRK'e, her zaman desteği ve yardımı ile yanımda olan değerli çalışma arkadaşım Ahmet DİNDAR'a,

Tez çalışmam boyunca destekleri ve yardımları ile yanımda olan değerli arkadaşlarım; Kaan SANCAKTAR'a, M. Halük ÜNSAL'a ve Deniz SAVCIÖZEN'e,

Her zaman yanımda olduğunu bildiğim değerli dostum Semih KUYUCU'ya,

Sağlamış olduğu imkanları ve diğer her türlü destek için öncelikle ASELSAN'a ve INOLAB'a,

Hayatımın her anında olduğu gibi tez dönemim boyunca da her zaman yanımda olan, bana moral ve motivasyon veren, beni sonsuz destekleyen annem Nesrin ÇETİN'e, babam Bayram ÇETİN'e ve kardeşim Atakan ÇETİN'e,

Hayatımın her anında yanımda olan, bana olan inancını ve desteğini her zaman hissettiğim, sonsuz bir özveri ve sabırla beni çalışmaya teşvik eden eşim Nurdoğan ÇETİN'e,

Sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. Motivasyon	1
1.3. Tezin Amacı	2
1.4. Bölümler	2
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Enerji Hasadı.....	4
2.1.1. Enerji Hasadı Teknolojileri	4
2.1.2. Enerji Hasadı Temelleri	8
2.2. Piezoelektrik Malzemeler	9
2.3. Titreşim Tabanlı Piezoelektrik Enerji Hasadı Teknikleri.....	12
2.3.1. Frekans Ayarlama Metodu.....	15
2.3.2. Bant Genişliği Arttırma Metodu	16
2.3.3. Geometrik Modifikasyon Metodu	17
2.4. Piezoelektrik Polimer Malzemeler ile Enerji Hasadı Uygulamaları	19
2.4.1. İnsan Tahrikli Hasatçılar	19
2.4.2. Titreşim Tabanlı Hasatçılar	20
2.4.3. Diğer Hasatçı Tipleri	21
3. TEORİK MODELLEME	23
3.1. Enerji Hasatçının Analitik Modellemesi	23
3.1.1. Piezoelektrik Malzemenin Matematiksel Modeli.....	27
3.1.2. Viskoelastik Malzemenin Matematiksel Modeli.....	30
3.2. Enerji Hasatçının Nümerik Modellemesi.....	32
3.2.1. Nümerik Çözüm Metotları ve Analiz Tipleri	32
3.2.2. Tek Sütunlu Yapının Titreşim Analizi	37

3.2.2.1.	Modelleme.....	37
3.2.2.2.	Modal Analiz.....	41
3.2.2.3.	Harmonik Tahrik Altında Yapının Titreşim Analizi	43
3.2.2.4.	Adım Tahrik Altında Yapının Titreşim Analizi	51
3.2.3.	Çok Sütunlu Yapının Titreşim Analizi.....	55
3.2.3.1.	Modal Analiz.....	55
3.2.3.2.	Harmonik ve Adım Tahrik Analizleri	57
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	59
4.1.	Enerji Hasadı Sistemi Üretimi.....	59
4.2.	Deney Düzeneği.....	65
4.3.	Enerji Hasadı Sistemi Deneyleri.....	66
4.3.1.	Tek Sütunlu Enerji Hasadı Sistemi Deneyleri	67
4.3.2.	Çok Sütunlu Enerji Hasadı Sistemi Deneyleri.....	76
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
5.1.	Sonuçlar	83
5.2.	Öneriler	88
	KAYNAKLAR.....	91
	EKLER	96
	ÖZGEÇMİŞ	100

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Küçük elektronik araçların güç gereksinimleri [1]	4
Çizelge 2.2. Enerji kaynaklarının avantajları ve dezavantajları [2]	5
Çizelge 2.3. Titreşim tabanlı enerji dönüşüm metotlarının avantajları ve dezavantajları [2], [4], [14]	7
Çizelge 2.4. Piezoelektrik malzeme özellikleri [21]	12
Çizelge 2.5. Bazı titreşim kaynakları doğal frekans değerleri [21].....	15
Çizelge 3.1. Denklem sistemi çözüm metotları [50]	33
Çizelge 3.2. ANSYS programında kullanılan piezoelektrik elemanlar	36
Çizelge 3.3. PVDF malzeme özellikleri [39]	38
Çizelge 3.4. PDMS malzeme özellikleri (3D) [51]	38
Çizelge 3.5. Çelik malzeme özellikleri.....	38
Çizelge 3.6. Yapıların geometrik özellikleri	39
Çizelge 3.7. Elemanlara ayırma işlemi özellikleri	39
Çizelge 3.8. Ucunda kütle olmayan ve olan durumlar için doğal frekans değerleri	41
Çizelge 3.9. İki boyutlu ve üç boyutlu modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması 41	
Çizelge 3.10. Farklı arka katman kalınlıkları için modal analiz sonuçları	42
Çizelge 3.11. Nümerik ve analitik doğal frekans değerleri	43
Çizelge 3.12. Uç kütleli ve kütleli yapıların analizinde kullanılan zaman adımları	43
Çizelge 3.13. Harmonik tahrik titreşimi altında gerçekleştirilen analiz çalışmaları 44	
Çizelge 3.14. Adım tahrik titreşimi altında gerçekleştirilen analiz çalışmaları	52
Çizelge 3.15. Çok sütunlu polimer sütunların geometrik özellikleri	55
Çizelge 3.16. Çok sütunlu yapıdaki her bir sütunun ilk beş doğal frekansı	56
Çizelge 4.1. Enerji hasadı sistemi konfigürasyonları.....	67
Çizelge 4.2. Tek sütunlu yapı boyutları	67
Çizelge 4.3. Nümerik, analitik ve deneysel doğal frekans sonuçları	71
Çizelge 4.4. Nümerik, analitik ve deneysel doğal frekans sonuçları	74
Çizelge 4.5. Farklı arka katman kalınlıklarının sahip yapıların frekans taraması ve voltaj / güç ölçüm testi sonuç değerleri.....	76
Çizelge 4.6. Dört sütunlu yapının boyutları	77
Çizelge 4.7. Dört sütunlu yapının doğal frekansları	77

Çizelge 4.8. Çok sütunlu yapının (7. konfigürasyon) boyutları	79
Çizelge 4.9. On altı (4 x 4) sütunlu yapının doğal frekansı	79
Çizelge 4.10. Dokuz (3 x 3) sütunlu yapının boyutları.....	80
Çizelge 4.11. Dokuz (3 x 3) sütunlu yapının doğal frekansları	81
Çizelge 4.12. Maksimum voltaj ve güç ölçüm değerleri	82
Çizelge 5.1. Enerji hasadı sistemleri performans değerleri.....	84
Çizelge 5.2. MEAS enerji hasadı sistemi performans değerleri	85

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Direk piezoelektrik etki (basma ve çekme kuvvetlerinde).....	10
Şekil 2.2. Ters piezoelektrik etki	10
Şekil 2.3. Tek örtülü ve iki örtülü giriş tipi enerji hasatçı.....	13
Şekil 2.4. Piezoelektrik iki örtülü giriş tipi enerji hasadı sistemi [25].....	13
Şekil 2.5. Piezoelektrik iki örtülü enerji hasatçı (MIDE QP40N) test düzeneği [26]	14
Şekil 2.6. Tek, iki ve üç katmanlı piezoelektrik enerji hasatçıları [27].....	14
Şekil 2.7. Piezoelektrik enerji hasatçı tasarımı [30].....	16
Şekil 2.8. Piezoelektrik enerji hasatçı prototipi ve test sonuçları [31].....	16
Şekil 2.9. Piezoelektrik enerji hasatçı tasarımı [33].....	17
Şekil 2.10. Farklı geometrik yapılarıdaki piezoelektrik enerji hasatçı tasarımları ve test sonuçları [37]	18
Şekil 2.11. Test düzeneği ve farklı yüzey alanına sahip piezoelektrik enerji hasatçıları için test sonuçları [38]	18
Şekil 2.12. PVDF ve PZT hasatçıları [41]	19
Şekil 2.13. PZT, MFC ve PVDF enerji hasatçıları [45].....	20
Şekil 2.14. 10 katmanlı P(VDF-TrFE) enerji hasatçı [47]	21
Şekil 2.15. Enerji hasadı sistemleri için yağmur ve rüzgar test düzenekleri [48]..	22
Şekil 2.16. Farklı yükseklik ve rüzgâr hızlarına bağlı olarak piezoelektrik malzemelerden üretilen çıkış voltaj değerleri [48].....	22
Şekil 3.1. Çok sütunlu piezoelektrik enerji hasadı sistemi modeli	24
Şekil 3.2. Tek sütunlu piezoelektrik enerji hasadı sistemi modeli.....	24
Şekil 3.3. Serbest titreşim (a) ve taban tahrik titreşimi (b) altında tek serbestlik dereceli model gösterimi	25
Şekil 3.4. Piezoelektrik malzeme için eksen takımı.....	27
Şekil 3.5. 33 modunda piezoelektrik malzeme kullanımı	28
Şekil 3.6. Viskoelastik malzeme modelleri	31
Şekil 3.7. Piezoelektrik elemanların geometrik şekilleri [50]	36
Şekil 3.8. Polimer alt katmanı (a) olan ve (b) olmayan uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sistemi modelleri.....	37
Şekil 3.9. Piezoelektrik filmin (a) tam ve (b) yarım elektrot konfigürasyonları	40
Şekil 3.10. Uç kütleli tek girişli yapının (a) 2 ve (b) 3 boyutlu modelleri	40

Şekil 3.11. Uç kütleli olan tek kirişli yapının (a) 2 ve (b) 3 boyutlu modelleri	40
Şekil 3.12. Ucunda kütle olmayan yapının (2D) ilk 5 mod şekli.....	42
Şekil 3.13. Ucunda kütle olan yapının (2D) ilk 5 mod şekli	42
Şekil 3.14. Harmonik titreşim altında yapının uç noktasının analitik ve nümerik cevabı (a) ve hata eğrisi (b).....	44
Şekil 3.15. Uç kütleli yapının yanal yöndeki uç deplasmanı (a), farklı elektrotlardan elde edilen taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c).....	45
Şekil 3.16. Uç kütleli ve kütsüz yapıların zaman tabanında uç deplasmanı (a), frekans tabanında uç deplasmanı (b), taban gerilimi (c), voltaj çıktısı (d).....	46
Şekil 3.17. Uç kütleli yapının farklı alt katman kalınlıkları için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)	47
Şekil 3.18. Uç kütleli yapının farklı malzeme özellikleri için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)	48
Şekil 3.19. Uç kütleli yapının farklı sönümlü ve sönümsüz malzeme modelleri için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c).....	49
Şekil 3.20. Farklı kalınlığa sahip piezoelektrik malzemelerin voltaj çıktısı	49
Şekil 3.21. Uç kütleli yapının farklı sertlik değerleri için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)	50
Şekil 3.22. Adım titreşim tahriki altında yapının uç noktasının analitik ve nümerik cevabı (a) ve hata eğrisi (b).....	51
Şekil 3.23. Adım tahrik titreşim altında yapının sönümsüz ve sönümlü konfigürasyonları için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c).....	52
Şekil 3.24. Adım tahrik titreşim altında yapının uç kütleli ve kütsüz konfigürasyonları için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c).....	53
Şekil 3.25. Adım tahrik titreşim altında yapının farklı sertlik değerleri için uç deplasmanı (a3), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)	54
Şekil 3.26. Adım tahrik titreşim altında yapının farklı arka katman kalınlıkları için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)	55
Şekil 3.27. Çok sütunlu yapının ilk doğal frekansları: polimer sütun-4 (a), taban polimer sütun-3 (b), polimer sütun-2 (c), polimer sütun-1 (d).....	56
Şekil 3.28. Çok sütunlu yapının sönümsüz modeli için harmonik rezonans frekansında titreşim altında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı(c)	57
Şekil 3.29. Çok sütunlu yapının sönümlü modeli için adım tahrik titreşimi altında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)	58

Şekil 4.1. Tek sütunlu polimer yapı üretimi için silikon kauçuk malzemeden kalıp	60
Şekil 4.2 Solüsyonun vakum cihazı içerisindeki görüntüsü (a) ve fırın (b)	60
Şekil 4.3. Tek sütunlu polimer (PDMS) yapı (a), dört çeyrek elektrot ile kaplı PVDF film (b), tek sütunlu enerji hasatçı (c).....	61
Şekil 4.4. Tek sütunlu uç kütleli enerji hasatçı	61
Şekil 4.5. Farklı arka katman kalınlıklarına sahip polimer yapılar	62
Şekil 4.6. Çok sütunlu (uç kütleli) polimer sütun üretimi için alüminyum kalıp tasarımı üst yüzeyi (a), alt yüzeyi (kapaksız) (b), alt yüzeyi (kapaklı) (c).....	62
Şekil 4.7. Çok sütunlu (uç kütleli) polimer sütun üretimi için alüminyum kalıp	63
Şekil 4.8. Çok sütunlu (dörtlü) uç kütleli polimer yapı (a), PVDF film (b), enerji hasat sistemi (c)	63
Şekil 4.9. Çok sütunlu (on altılı) uç kütleli polimer yapı (a), PVDF film (b), enerji hasat sistemi (c)	64
Şekil 4.10. Çok sütunlu (dokuzlu) uç kütleli polimer yapı (a), PVDF film (b), enerji hasat sistemi (c)	65
Şekil 4.11. Titreşim Sarsıcı (a), Sinyal Üretici (b), Ölçme Ölçer (c), Veri Toplama Sistemi (d), Deney Düzenekçi (e)	66
Şekil 4.12. Harmonik titreşim altında iki yarım elektrottan alınan voltaj çıkış sinyalleri	68
Şekil 4.13. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	68
Şekil 4.14. Güç çıkış değeri ölçümü için kurulan deney düzenekçi	69
Şekil 4.15. Tek sütunlu yapı (d33 ve d31 mod) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçümü	69
Şekil 4.16. Tek sütunlu yapı d33 ve d31 modlarında çalışma prensibi	70
Şekil 4.17. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	71
Şekil 4.18. Rezonans frekansında harmonik titreşim altında deneysel (a) ve nümerik (b) sonuçlar.....	71
Şekil 4.19. Tek sütunlu yapı (d33 mod) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçüm sonuçları.....	72
Şekil 4.20. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	72

Şekil 4.21. Rezonans frekansında harmonik titreşim altında deneysel (a) ve nümerik (b) sonuçlar.....	73
Şekil 4.22. Tek sütunlu yapı (110 µm'lik PVDF kullanılarak) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçüm sonuçları	73
Şekil 4.23. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	74
Şekil 4.24. Rezonans frekansında harmonik titreşim altında deneysel (a) ve nümerik (b) sonuçlar.....	74
Şekil 4.25. Tek sütunlu yapı (uç kütleli) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçüm sonuçları.....	75
Şekil 4.26. Tek sütunlu yapı (farklı arka katman kalınlıklarına sahip) frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	75
Şekil 4.27. Tek sütunlu yapı (farklı arka katman kalınlıklarına sahip) voltaj (a) ve güç (b) çıkış değerleri ölçüm sonuçları	76
Şekil 4.28. Dört sütunlu yapı sabit harmonik titreşim testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	77
Şekil 4.29. Dört sütunlu yapının frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	78
Şekil 4.30. Dört sütunlu yapının toplam güç ve voltaj çıkış değerleri ölçümü.....	78
Şekil 4.31. On altı (4 x 4) sütunlu yapının frekans taraması testi (a) zaman tabanında sonuçları, (b) frekans tabanında sonuçları	79
Şekil 4.32. On altı (4 x 4) sütunlu yapının toplam voltaj ve güç çıkış değerleri	80
Şekil 4.33. Düz (a) ve eğimli (b) test tablası üzerine yerleştirilen enerji hasadı sistemi	80
Şekil 4.34. Dokuz (3 x 3) sütunlu uç kütleli yapının frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında	81
Şekil 4.35. Dokuz (3 x 3) sütunlu uç kütleli yapının düz yüzey (a) ve eğimli yüzey (b) üzerinde toplam voltaj ve güç çıkış ölçüm sonuçları	82
Şekil 5.1. MEAS Enerji Hasadı Sistemi.....	85
Şekil 5.2. MEAS enerji hasadı sistemi voltaj ve güç çıkış eğrisi.....	85
Şekil 5.3. Enerji Hasadı Sistemi Kavramsal Tasarım Örneği	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ζ_e	Elektriksel sönüm oranı
ζ_m	Mekanik sönüm oranı
A	Uygulanan ivme tahrik değeri
Y	Uygulanan deplasman değeri
P_{dens}	Güç yoğunluğu
P_{norm}	Normalize güç yoğunluğu
FoM_v	Performans katsayısı
η_{enerji}	Enerji verimi
$\eta_{güç}$	Güç verimi
E_{in}	Giriş enerjisi
E_{out}	Çıkış enerjisi
P_{in}	Giriş gücü
P_{out}	Çıkış gücü
d	Piezoelektrik gerinim sabiti
g	Piezoelektrik voltaj sabiti
k	Elektromekanik kaplin faktörü
ε	Gerinim sabiti
m_{eq}	Eş değer kütle
k_{eq}	Rijitlik katsayısı
c_{eq}	Sönümlenme katsayısı
E	Kiriş elastik modülü
I	Kiriş atalet momenti
L	Kiriş uzunluğu
m_{beam}	Kirişin kütlesi
m_{uc}	Uç kütle
w_n	Doğal frekans
\emptyset	Faz açısı
$x(t)$	Kütlenin zamana bağlı mutlak deplasman cevabı
w	Tahrik frekansı
Y_h	Harmonik tahrik taban deplasmanı genliğini
Y_s	Adım tahrik taban deplasman genliği

$y(t)_h$	Zamana bağılı harmonik taban deplasmanı
$z(t)$	Kütlenin tabana göre bağılı deplasman cevabı
w_d	Sönümlü doğal frekans
$[S]$	Mekanik gerinim matrisi
$[T]$	Mekanik gerilme matrisi
$[E]$	Elektrik alan matrisi
$[D]$	Elektrik yer değiştirme matrisi
s_{ij}^E	Esneklik katsayısı
d_{ij}	Piezoelektrik modül
ϵ_{ij}	Dielektrik sabiti
A_p	Piezoelektrik elemanın yüzey alanı
t_p	Piezoelektrik elemanın kalınlığı
F	Uygulanan kuvvet
V_s	Uygulanan potansiyel fark
q	Uygulanan yük miktarı
g_{33}	Piezoelektrik voltaj sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti (8.85×10^{-12} Farads/m)
$\epsilon_{3,r}$	Bağılı dielektrik katsayısı
η	Verim
k_{33}	Elektromekanik kaplin katsayısı
Q	Kalite faktörü
P	Güç çıkışı
V_{rms}	Voltaj (rms)
R	Empedans
ν	Malzemenin viskozitesi
σ	Uygulanan mekanik gerilim
ϵ	Gerinim
$\dot{\epsilon}$	Gerinim hızı
$J(t)$	Sünme değişimi
$E_r(t)$	Gerilme gevşemesi değişimi
τ	Gevşeme zamanı
E_∞	Saf elastik elemanın modülü
$[A]$	Katsayılar matrisi

$\{B\}$	Karşı taraf vektörü
$\{x\}$	Bilinmeyenler vektörü
$\{u\}$	Yer değiştirme cevap vektörü
$\{F^a\}$	Uygulanan kuvvet vektörü
$\{F^r\}$	Tepki kuvvet vektörü
$\{\Phi_i\}$	Öz vektör
λ_i	Öz değer
$\{\ddot{u}(t)\}$	İvme vektörü
$\{\dot{u}(t)\}$	Hız vektörü
TS	Zaman adımı
α	Sönüm katsayısı (alfa)
β	Sönüm katsayısı (beta)
$\{v\}$	Elektrik potansiyeli cevap vektörü
$[C^{vh}]$	Dielektrik sönümlenme matrisi
$[K^Z]$	Piezoelektrik kaplin matrisi
$[K^d]$	Dielektrik geçirgenlik katsayı matrisi
ν_p	Poisson oranı
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

RFID	Radio-frequency Identification (Radyo Frekans ile Tanımlama)
MEMS	Microelectromechanical Systems (Mikro-Elektromekanik Sistem)
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken)
MOMS	Micro-opto-mechanical systems (Mikro Optomekanik Sistem)
PCG	Preconditioned Conjugate Gradient
ICCG	Incomplete Cholesky Conjugate Gradient
JCG	Jacobi Conjugate Gradient
DOF	Degree of freedom (Serbestlik Derecesi)
PVDF	Polyvinylidene fluoride (Poliviniliden florür)
PZT	Lead zirconate titanate (Kurşun zirkonat titanat)
PDMS	Polydimethylsiloxane (Polidimetilsiloksan)

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Günümüzde düşük güç ihtiyacı olan küçük ve taşınabilir elektronik cihazların ve kablosuz sensör ağlarının kullanımı giderek artmaktadır. Aynı zamanda kendi gücünü sağlayan cihazlara talep her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Elektronik cihazların büyük çoğunluğunda elektrik enerjisi ihtiyacı için bataryalar kullanılmaktadır. Fakat bataryaların, ömrünün sınırlı olması, tükendiğinde insan müdahalesi ile değiştirilmesi gerekmesi ve bunun yanı sıra karmaşık ve yüksek maliyetli bir geri dönüşüm işlemine sahip olması giderek batarya kullanımını düşürmektedir. Bu kapsamda elektronik cihazların güç ihtiyacı için, ortamda var olan alternatif enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretim teknikleri araştırılmaya başlanmıştır. Bu sayede harici bir güç kaynağı gereksiniminin ve periyodik batarya değişiminin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.

Doğada bulunan başlıca enerji kaynakları güneş enerjisi, ısı enerjisi, rüzgar enerjisi, akustik gürültü ve mekanik titreşimler olarak sayılabilir. Güneş enerjisinin çok fazla yüzey alanı gerektirmesi ve ışık şiddetinin hava koşullarına bağlı olması, ısı enerjisinin büyük sıcaklık farklarını gerektirmesi, rüzgar enerjisinin küçük elektronik sistemler için pratik olmaması, akustik gürültünün yüksek gürültü seviyelerine ihtiyaç duyması ve ses yayılım yönüne duyarlı olması sebebiyle; küçük elektronik sistemlerin güç gereksinimlerinin karşılanması için en uygun enerji kaynağı mekanik titreşimler olarak görülmektedir.

Titreşim kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmesi kapsamında en çok uygulanan teknik ise, piezoelektrik malzemelerin kullanılması ile çevrede var olan mekanik enerjinin hasat edilmesidir. Piezoelektrik malzemeler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine direkt dönüştürebilmesi, enerji dönüşümü için harici bir güç kaynağı gerektirmemesi, makro ve mikro boyutlarda üretilebilmesi, belirli koşullar altında sınırsız bir ömre sahip olması ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gibi özellikleri sayesinde, günümüzde özellikle kendi gücünü sağlayan elektronik cihazların tasarımında kullanılmaktadır.

1.2. Motivasyon

Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri genelde bir elastik katmanın iki adet piezoelektrik katman arasına sıkıştırılması ile iki örtülü kiriş yapısında

üretilmektedir. Enerji hasatçılarının titreşen ana yapının üzerine yerleştirilmesi ve ana yapının tahrik frekansı ile hasatçının doğal frekansının eşleştirilmesi sonucu ana yapıdan enerji hasat edilmektedir. Bu tezin temel motivasyonu, önceki çalışmalardan farklı olarak, bir piezoelektrik alt katman üzerine yerleştirilen polimer sütunlar vasıtasıyla enerjinin hasat edilmesini sağlamaktır. Bu konfigürasyonda, sütunlar titreşen ana yapı üzerinde çoklu osilatörler gibi hareket etmektedir ve titreşim enerjisinin ana yapıdan emilmesini sağlamaktadır. Daha sonra sütunlarda depolanan elastik enerji, piezoelektrik katman üzerinde oluşan gerilme yığılmaları vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Bunun yanı sıra, gerçek hayatta titreşim kaynakları genelde gelişigüzel titreşimlere sahiptir. Bu durumda, piezoelektrik enerji hasadı sisteminin doğal frekansının spesifik bir frekansa ayarlanması efektif bir yaklaşım olmayacaktır. Çünkü ana yapının frekansındaki küçük değişimler bile hasatçı tarafından hasat edilen enerji miktarını büyük oranda düşürmektedir. Bu yüzden enerji hasatçının geniş bir frekans aralığında verimliliğinin artırılması gereklidir. Bu tez kapsamında, enerji hasadı sisteminin geniş banttaki titreşimler için kullanılması da amaçlanmaktadır.

1.3. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, düşük frekanstaki titreşimler için (0-150 Hz) polimer sütun şeklinde üretilen ve titreşen ana yapıdan enerjinin emilmesini sağlayan osilatörler yardımıyla, piezoelektrik özellik gösteren bir enerji hasadı sisteminin tasarımıdır. Ayrıca çoklu sütun yapısıyla enerjinin geniş bir bant aralığında ve yüksek verimlilikle hasat edilmesi amaçlanmaktadır. Bunun yanı sıra tasarlanan hasatçı esnek, gerinebilir ve giyilebilir özelliklere sahip olması ve eğimli yüzeylere monte edilebilir bir yapıya sahip olması hedeflenmektedir.

1.4. Bölümler

İkinci bölümde, enerji hasadı teknikleri ve temelleri, piezoelektrik malzeme özellikleri, piezoelektrik enerji hasadı metotları ve piezoelektrik polimer malzemelerin enerji hasadı sistemlerindeki uygulamaları ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, enerji hasadı sisteminin analitik ve nümerik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Analitik model, tek sütunlu yapının tek serbestlik dereceli modeli için serbest, harmonik ve adım tahrik titreşimleri altında incelenmiştir.

Modelleme uç kütleinin olduğu ve olmadığı durumlar için ayrı gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, piezoelektrik malzeme ve viskoelastik sönümlenme modelleri üzerinde çalışılmıştır. Piezoelektrik malzemelerin elektro-mekanik akuple özelliklere sahip olması sebebiyle çoklu fizik çözümleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda enerji hasadı sisteminin nümerik modeli ANSYS Mechanical APDL / Multiphysics yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Nümerik modelleme tekniği kullanılarak tek sütunlu ve çok sütunlu enerji hasadı sistemlerinin birçok farklı konfigürasyon için (uç kütleli ve kütsesiz, farklı arka katman kalınlıkları, malzeme sertlik değerleri, sönümlenme özellikleri, piezoelektrik malzeme kalınlıkları) titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler dâhilinde, modal, harmonik ve geçiş analizleri üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca analitik model ve nümerik model kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde, enerji hasadı sisteminin üretimi, deney düzeneği tasarımı ve gerçekleştirilen deneyler ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Enerji hasadı sistemi tek ve çok sütunlu yapılarında, farklı geometrik boyutlarda, farklı sertlikte polimer malzemeler kullanılarak, farklı arka katman kalınlıklarında ve farklı kalınlığa sahip piezoelektrik malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Sonrasında tasarlanan her bir yapının farklı taban tahrik kuvvetleri altında frekans tarama testleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle farklı konfigürasyonlara sahip enerji hasadı sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra hasatçılarının maksimum güç çıkış değerine karşılık gelen optimum direnç değerleri tespit edilmiştir. Deneylerde enerji hasadı sistemlerinden elde edilen maksimum voltaj ve güç çıkış değerleri ölçülmüştür. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Beşinci bölümde, farklı konfigürasyonlara sahip enerji hasadı sistemlerinin performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Karşılaştırma için temel parametreler, güç yoğunluğu, normalize güç yoğunluğu, performans katsayısı ve verim olarak belirlenmiştir. Ayrıca literatürde var olan ve ticari olarak kullanılan enerji hasadı sistemi kullanılarak gerçekleştirilen test sonuçlarına da yer verilmiştir. Bunun yanı sıra bu bölümde gelecek dönemde gerçekleştirilmesi planlanan çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümün amacı enerji hasadı teknolojileri, kullanım alanları ve temelleri, piezoelektrik malzemelerin özellikleri, kullanım alanları ve çeşitleri, titreşim tabanlı piezoelektrik enerji hasadı teknikleri ile ilgili bilgiler sunmaktır. Bunun yanı sıra, piezoelektrik polimer malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen enerji hasadı uygulamaları ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar özetlenmektedir.

2.1. Enerji Hasadı

2.1.1. Enerji Hasadı Teknolojileri

Enerji hasadı, etrafta doğal yollardan var olan enerjinin yakalanması, elektronik cihazlar için kullanılabilir bir enerjiye dönüştürülmesi ve daha sonra kullanılmak üzere saklanması işlemidir. Bu işlem, elektronik araçlara sınırsız bir yaşam süresi sağlamaktadır. Bu kapsamda, öncelikle elektronik sistemlerin güç harcama miktarları hakkında bir bilgi birikimine sahip olmak gereklidir. Bu sayede, farklı enerji kaynaklarından hasat edilebilen enerji miktarları daha kolay bir şekilde karşılaştırılabilir. Çizelge 2.1'de küçük elektronik araçların güç gereksinim değerleri verilmiştir [1].

Çizelge 2.1. Küçük elektronik araçların güç gereksinimleri [1]

Elektronik Sistem	Güç Gereksinimi
Bekleme Konumu	10 nW
32 kHz kuvars osilatör	100 nW
Elektronik saat, hesap makinesi	1 μ W
Radyo frekans ile tanımlama (RFID) etiketi	10 μ W
İşitme cihazı	100 μ W
Minyatür FM Alıcı	1 mW
Bluetooth alıcı-verici	10 mW
MP3	100 mW
GSM	1 W
Diz üstü bilgisayar mikroişlemci, bisiklet ampulü	10 W
Masa üstü bilgisayar mikroişlemci	100 W

Çevrede bulunan başlıca enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, ısı enerjisi, radyo frekansı radyasyonu ve mekanik titreşimler olarak sıralanabilir. Her bir enerji kaynağının avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.2'de özetlenmiştir [2].

Çizelge 2.2. Enerji kaynaklarının avantajları ve dezavantajları [2]

Enerji Kaynağı	Avantajlar	Dezavantajlar
Güneş Enerjisi	Doğada bol bulunur, Ucuz, Elektronik cihazlar ile yüksek uyumluluğa sahip, Geniş dalga boyu aralıklarında yüksek verimliliğe sahip, Hareketsiz parçalardan oluşur, Uzun ömre sahip.	Yerleştirmede kısıtlamaları bulunur, Engelden uzakta ve temiz olması gerekir, Günün sadece belli bir bölümünde enerji sağlar, Küçük ölçekli hasatçılar için uygun değildir, çünkü güç çıkışı direk yüzey alanına bağlıdır, Enerji, enlem ve atmosfere bağlıdır
Rüzgar Enerjisi	Doğada bol bulunur, Ucuz.	Türbin kanatlarının yüksek viskoz sürtünmesinden dolayı küçük rüzgâr türbinlerinin verimleri düşüktür, Rulmanlı enerji hasatçıların, sürtünmeden dolayı kayıpları fazladır, Çok hareketli parça içerir, Karışık bir yapıya sahiptir, Kolaylıkla küçük yapıda üretilemez
Isıl Enerji	Hareketsiz parçalardan oluşur, Basit yapıya sahiptir, Küçük yapıda üretilebilir.	Enerji alıcı ve vericinin ısıl direncinden etkilenir, Enerji dönüşüm verimliliği Carnot verimliliği ile sınırlıdır, Sıcaklık farkları küçük ölçeklerde az olma eğilimi gösterir, Yüksek maliyete sahiptir.
Radyo Frekansı Radyasyonu	Güç seviyesi kontrol edilebilir ve tahmin edilebilir, Güç uzak bir mesafeden sağlanabilir, Hareketsiz parçalardan oluşur.	Özel bir radyasyon kaynağı olmadan, çevre seviyeleri çok düşük kalır ve geniş bir spektrumda yayılır, Kaynaktan uzaklık arttıkça alan gücü düşer, Ultra yüksek frekanslarda yüksek güç kaybına sahiptir, Biyolojik sistemlere olumsuz etkilerinden dolayı yayım için güç limiti vardır.
Mekanik Titreşimler	Bol bulunur, İnsan hareketinden enerji elde etme uygulamalarında güç çıkışları artma eğilimi gösterir.	Genliğe ve frekansa bağlı olarak değişkenlik gösterir, Titreşim olmadığı zamanlarda kesintiler olur, Boyut küçüldükçe, düşük frekansta titreşime sahip cihazlardan enerji hasat edilmesi zorlaşır.

Enerji hasatçılarının taşınabilir güç kaynağı olarak gömülü sistemlerde kullanımı için sistemin performansının ve ömrünün göz önünde bulundurulması gereklidir. Taşınabilir güç kaynakları genel olarak elektriksel (güç yoğunluğu, maksimum voltaj ve akım), fiziksel (boyut, şekil ve ağırlık), çevresel (çalışma sıcaklık aralığı, suya dayanım), işletim ve bakım özelliklerine sahiptir. Günümüzde düşük ağırlıkta ve boyutlarda, yüksek güç kapasitesine sahip, yüksek güvenilirlikte ve düşük maliyette olan teknoloji tasarımları üzerinde çalışılmaktadır. Küçük elektronik araçların güç tüketim seviyeleri genelde mW veya μ W mertebesinde. Bu kapsamda mekanik titreşimler küçük elektronik sistemler için en uygun enerji kaynaklarından biridir [3].

Titreşen veya hareket eden araçların sahip olduğu mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi genel olarak üç farklı mekanizma ile gerçekleştirilebilir: elektromanyetik, elektrostatik ve piezoelektrik [4].

Elektromanyetik enerji hasadı elektromanyetik indüksiyon prensibi ile çalışmaktadır. Elektromanyetik indüksiyon, bir iletken çevresindeki manyetik alanın değişimi sonucu iletkende elektrik akımı oluşması olarak tanımlanır. Mıknatıs ve bobin arasındaki bağıl hareket veya manyetik alan değişimi sonucunda elektrik üretilir. Elektromanyetik indüksiyon ile enerji hasadı sabit mıknatıslar, bir bobin ve bir ankastre giriş kullanılarak gerçekleştirilebilir [5].

Elektrostatik enerji hasadı, değişken kondansatörlerin kapasitanslarındaki değişim sonucu sağlanır. Değişken yüklü kondansatörlerin iki paralel metal tabakasının arasındaki bağıl hareket vasıtasıyla mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Enerji hasadı metal tabakaların arasındaki elektrostatik kuvvete karşı yapılan iş ile meydana gelir [6].

Piezoelektrik malzemeler basınç, titreşim veya kuvvet uygulanması sonucu ortaya çıkan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu malzemeler mekanik titreşime veya harekete maruz bırakıldığında, elektriksel bir yük üretme yeteneğine sahiptir. Elektrik enerjisi şarj edilebilir piller veya kapasitörler aracılığıyla depolanmaktadır. Piezoelektrik malzemeler ile güç üretilmesi konusunda literatürde pek çok uygulama mevcuttur [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Elektromanyetik, elektrostatik ve piezoelektrik metotlar karşılaştırıldığında, genelde piezoelektrik hasatçıların daha yüksek enerji yoğunluğu sağladığı

görülmüştür. Ayrıca piezoelektrik malzemeler sistem içinde daha esnek kullanım özelliğine sahiptir ve aynı güç yoğunluğu üretimi için, piezoelektrik hasatçı elektromanyetik üreteçten daha düşük boyuta sahiptir. Bunun yanı sıra piezoelektrik enerji hasatçıları düşük frekanslı titreşim uygulamalarında kullanılırken, elektromanyetik enerji hasatçıları yüksek frekanslı titreşimlerde kullanıma uygundur [13], [14], [15].

Piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik metotların avantaj ve dezavantajları ile teorik ve maksimum enerji yoğunluğu değerleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Titreşim tabanlı enerji dönüşüm metotlarının avantajları ve dezavantajları [2], [4], [14]

Metot	Avantajlar	Dezavantajlar
Piezoelektrik	1.Ayrı bir güç kaynağı ihtiyacı yok 2.En yüksek enerji yoğunluğuna sahip 3.Mekanik duraklama yok 4.Voltaj: 2-10 V 5.Küçük boyutlarda üretilebilir 6.MEMS ile daha uyumlu (elektromanyetik ile karşılaştırıldığında) Not: Maksimum / Teorik Enerji Yoğunluğu: 35.4 / 335 mJ/cm ³	1.Yüksek çıkış empedansına sahip olma eğilimli 2.Kaplin faktörü malzeme özelliklerine bağlı 3.Maliyeti yüksek 4.Seramik yapıda olan malzemeler kırılğan özellikte
Elektromanyetik	1.Ayrı bir güç kaynağı ihtiyacı yok 2.Mekanik duraklama yok 3.Düşük sönümlenme oranı kabiliyetine sahip Not: Maksimum / Teorik Enerji Yoğunluğu: 24.8 / 400 mJ/cm ³	1.Maksimum voltaj:0.1V 2.MEMS ile entegrasyonu zor 3.Düşük frekanslarda ve düşük boyutlarda düşük verimli 4.Karışık üretim ve montaj işlemine sahip
Elektrostatik	1.MEMS ile entegrasyonu kolay 2.Voltaj: 2-10 V 3.Yüksek kaplin faktörü 4.Küçük boyutlarda üretilebilir Not: Maksimum / Teorik Enerji Yoğunluğu: 4 / 44 mJ/cm ³	1.Ayrı bir güç kaynağı ihtiyacı var 2.Mekanik duraklama ihtiyacı var 3.Karışık bir devre sistemi ihtiyacı doğabilir

2.1.2. Enerji Hasadı Temelleri

Titreşim tabanlı enerji hasadı sisteminin en genel modeli kütle, yay ve sönüm elemanından (tek serbestlik dereceli model) oluşmaktadır. Sistemin doğal frekansı, w_n , tahrik frekansına, w , eşit olduğunda sistemden maksimum güç elde edilmektedir. Fakat tüm sistemler, titreşim sırasında enerjiyi harcarlar. Bu yüzden, sistemin sönüm özelliğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kapsamda, tek serbestlik dereceli modele sahip bir enerji hasadı sisteminden elde edilen güç aşağıdaki denklemde (2.1) gösterilmektedir.

$$P = \frac{\zeta_e}{4w_n(\zeta_e + \zeta_m)^2} mA^2 \quad (2.1)$$

Bu denklemde P güç çıkışını, ζ_e elektriksel sönüm oranını, ζ_m mekanik sönüm oranını, m kütle, A ise uygulanan ivme tahrik değerini göstermektedir. Denklemden görülebileceği üzere, hasatçıdan elde edilen güç değeri sistemin rezonans frekansı ile ters orantılıyken; uygulanan ivme değeri ve sistem kütlesi ile doğru orantılıdır. Bu yüzden yüksek genlikte ve düşük frekanslı titreşimler altında enerji hasatçıdan yüksek güç elde edilmektedir. Bunun yanı sıra, elektriksel sönüm oranı, mekanik sönüm oranı ile eşleştirildiğinde sistemden maksimum güç sağlanmaktadır [16]. Bu kapsamda, çalışma frekansının sistemin doğal frekansı ile eşleştirildiği durumda sistemden elde edilen maksimum güç aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (2.2).

$$P_{max} = \frac{mY^2w_n^3}{16\zeta_m}, A = w_n^2Y \quad (2.2)$$

Bu denklemde, Y uygulanan deplasmanı göstermektedir.

Enerji hasadı sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması amacıyla sıklıkla kullanılan parametreler güç yoğunluğu, normalize güç yoğunluğu, performans katsayısı ve güç veya enerji verimi olarak sıralanmaktadır.

Güç yoğunluğu, ölçülen güç çıkışı değerinin enerji hasadı sisteminin hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır (2.3). Bu sayede sistemlerin performansı boyutlarından bağımsız olarak karşılaştırılabilmektedir. Fakat bu parametre titreşim kaynağının etkisini açıklamamaktadır. Aşağıdaki denklemde P_{dens} güç yoğunluğunu ve V sistemin hacmini göstermektedir.

$$P_{dens} = \frac{P_{max}}{V} \quad (2.3)$$

Normalize güç yoğunluğu ise, sistemlerin performansının uygulanan titreşim seviyelerinden bağımsızlaştırarak hesaplanmasını sağlamaktadır [17]. Bu sayede farklı ivme seviyelerinde tahrik edilen sistemler karşılaştırılabilmektedir. Normalize güç yoğunluğu, denklem (2.4) ile gösterilmiştir.

$$P_{norm} = \frac{P_{dens}}{A^2} \quad (2.4)$$

Performans katsayısı değeri, sisteme sağlanan giriş enerjisi ile ilgili yapılan bir varsayıma bağlı olarak sistemin veriminin tahmin edilmesi esasına dayanmaktadır [15]. Performans katsayısı değeri, sistemden ölçülen güç çıkışının, sisteme verilebilecek maksimum güç girişine oranı ile hesaplanmaktadır (2.5). Bu denklemde, FOM_v performans katsayısını ve ρ_{au} altın yoğunluğunu göstermektedir.

$$FOM_v = \frac{P_{max}}{\frac{1}{16} \rho_{au} V^{4/3} w^3} \quad (2.5)$$

Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünde enerji veya güç verimi, enerji hasadı sistemlerinin karşılaştırılmasında kullanılan bir diğer temel parametredir. Bu sayede, farklı boyutta ve farklı titreşim tahrik seviyelerinde kullanılan enerji hasatçıların performansları karşılaştırılabilir. Enerji hasadı sisteminin verimi, girişte uygulanan mekanik enerjinin veya gücün çıkış elektrik enerjisine veya güce oranı olarak tanımlanmaktadır (2.6 ve 2.7). Denklemlerde E_{in} ve E_{out} giriş ve çıkış enerjilerini, P_{in} ve P_{out} giriş ve çıkış güçlerini, V_{out} ölçülen çıkış voltajını, R karşılık gelen empedans değerini, $F(t)$ titreşim kaynağı tarafından uygulanan kuvveti, \dot{u} titreşim kaynağı hızını, $a(t)$ uygulanan ivme genliğini göstermektedir.

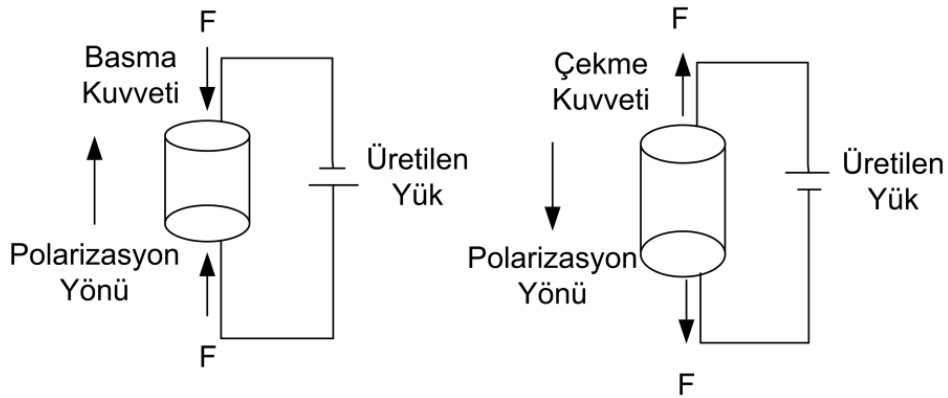
$$\eta_{enerji} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100 \% = \frac{\int \frac{V_{out}^2}{R} dt}{\int F(t) \dot{u} dt} \times 100 \% = \frac{\int \frac{V_{out}^2}{R} dt}{\int m a(t) \dot{u} dt} \quad (2.6)$$

$$\eta_{güç} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (2.7)$$

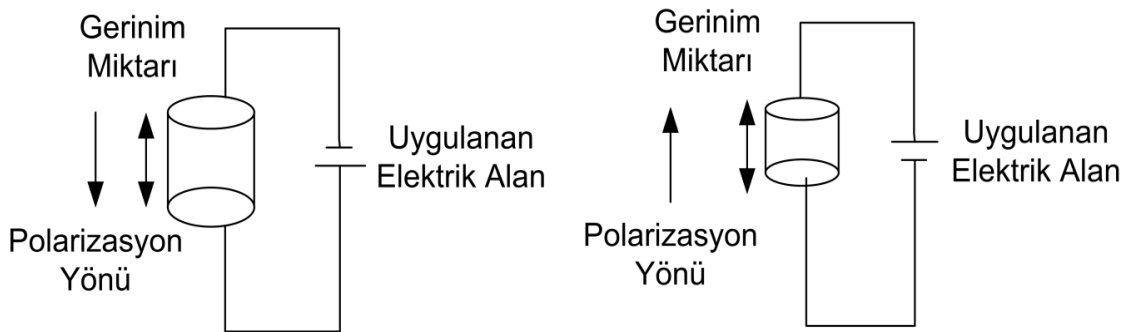
2.2. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik etki ilk olarak Curie kardeşler tarafından (Jacques ve Pierre Curie) 1880 yılında keşfedilmiştir. Bu etki kuvars, turmalin, rouchelle tuzu vb. kristaller ile yapılan çalışmalar sonucunda kanıtlanmıştır. Piezoelektrik özellik gösteren bir malzemeye basınç uygulandığında, malzeme yüzeylerinde elektrik yüklerinin oluşmasına direk piezoelektrik etki denir. Bu etki temelde, sürekli kutuplaşmaya

sahip asimetrik bir iyonsal kristalin uygulanan basınçla doğru orantılı olarak kutupları arasındaki uzaklığın azalması ve yüzeyindeki yük birikiminin değişmesi esasına dayanır. Bu yüzden kutuplar arasında bir gerilim farkı oluşur ve bir iletkenle birleştirilirse akım meydana gelir. Elektrik yüklerinin yoğunluğu, malzemenin maruz kaldığı basınçla doğru orantılıdır. Buna karşın, piezoelektrik malzemenin elektrotlarına bir elektrik alan uygulandığında, malzeme deformasyona maruz kalır. Bu özelliğe ters piezoelektrik etki denilmektedir. Direk etki ile çalışan piezoelektrik malzemeler sensör veya algılayıcı olarak kullanılırken, ters piezoelektrik etki malzemelerin sistemlerde uyarıcı olarak kullanılmasına imkân vermektedir. Direk ve ters piezoelektrik etki prensipleri Şekil 2.2 ve 2.3'te gösterilmektedir [18], [19].



Şekil 2.1. Direk piezoelektrik etki (basma ve çekme kuvvetlerinde)



Şekil 2.2. Ters piezoelektrik etki

Günümüzde algılayıcı, uyarıcı veya enerji hasatçı olarak piezoelektrik özellik gösteren pek çok piezoelektrik malzeme kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin temel uygulama alanları iletişim ve kontrol sektörü (radyo, televizyon, otomotiv radar), endüstriyel sektör (deniz radarı, tahribatsız teknikler, titreşim sönümlenme, yüksek sıcaklık sensörleri, kimyasal ve biyolojik sensörler vb.), sağlık sektörü (müdahalesiz tıbbi kontroller, hipertemi vb.), tüketici sektörü

(kol saati, kamera odakları, bilgisayar modemleri vb.) ve güncel uygulamalar (MEMS ve MOMS aletler, doğayı yansıtan araçlar, akustik ve elektronik araçlar vb.) olarak sıralanmaktadır [20].

Piezoelektrik malzemeler yapısal karakteristiklerine göre dört gruba ayrılabilir: Piezo-seramikler (kurşun zirkonat titanat (PZT), baryum titanat vb.), piezoelektrik kristaller (kuvars, rouchelle tuzu vb.), piezo-polimerler (polivinilidin florür(PVDF), naylon vb.), kompozitler. Bu malzemeler arasında en yüksek güç çıkışı piezo-seramiklerden elde edilmektedir ve genelde mW mertebesindedir. Fakat piezo-seramikler kırılğan yapıda olduklarından fazla miktarda deformasyona maruz bırakılamazlar. Piezo-polimerler ise en az güç çıkışı sağlayan malzemelerdir. Güç çıkışı μW veya nW büyüklüğündedir. Buna karşın, piezo-polimerler en fazla esnekliğe ve düşük yoğunluğa sahip olduğu için eğimli yüzeyler üzerinde herhangi bir kalıcı deformasyona uğramadan kullanılabilirler. Piezoelektrik tek kristallerin güç çıkışı ise, benzer şekilde mW mertebesindedir. Fakat yüksek maliyete sahip olduklarından literatürde en az kullanılan malzemelerdir. En yaygın olarak kullanılan piezoelektrik malzeme bir piezo-seramik olan PZT (kurşun zirkonat titanat)'dir. Piezo-seramik ve tek kristaller ferroelektrik özelliğe sahiptir ve Curie sıcaklığı olarak tabir edilen kritik sıcaklığın altında kendiliğinden oluşan yerel kutupları (dipol) vardır. Bu yüzden piezo-polimerlerden daha iyi piezoelektrik özelliklere sahiptir [21], [22].

Enerji hasadı uygulamalarında sıklıkla kullanılan dört farklı piezoelektrik malzemenin özellikleri Çizelge 2,4'te gösterilmiştir. Piezoelektrik gerinim sabiti (d), birim mekanik gerilim altında indüklenen kutuplaşma veya birim elektrik alan altında oluşan mekanik gerinimi ifade etmektedir. Piezoelektrik voltaj sabiti (g), birim mekanik gerilim altında indüklenen elektrik alan büyüklüğünü gösterir. Elektromekanik kaplin faktörü (k), mekanik ile elektrik enerji dönüşüm verimliliğinin kareköküdür. Dielektrik sabiti (ϵ) malzemenin yük depolama kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 2,4'te dört farklı piezoelektrik malzemenin özelliklerinden bazıları gösterilmektedir [21]. En düşük yoğunluğa ve elastik modüle sahip malzemenin piezoelektrik polimer (Poliviniliden florür (PVDF)) ve piezoelektrik yük sabiti ve dielektrik sabiti en yüksek olan malzemenin tek kristal olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.4. Piezoelektrik malzeme özellikleri [21]

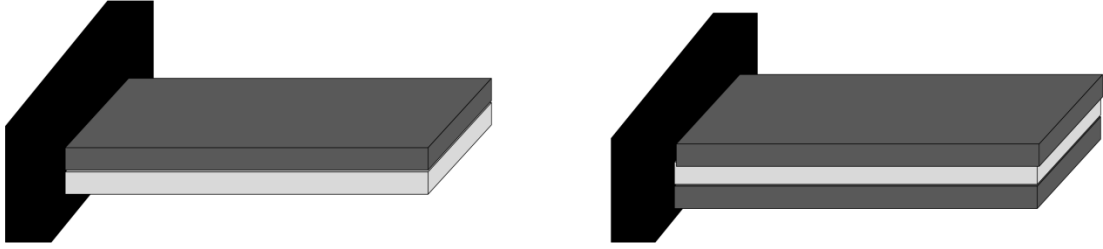
Özellik	PZT-5H (seramik)	PMN-32PT <001> oryantasyonu (tek kristal)	PZT-polimer kompozit (%30 PZT)	PVDF (polimer)
Yoğunluk (g/cm ³)	7.65	8.10	3.08	1.78
Dielektrik sabiti	3250	7000	380	6
Elastik Modülü (GPa)	71.4	20.3	-	2
Piezoelektrik Yük Sabitini, d ₃₃ (pC/N)	590	1620	375	25
Piezoelektrik Yük Sabitini,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

2.3. Titreşim Tabanlı Piezoelektrik Enerji Hasadı Teknikleri

Titreşim tabanlı piezoelektrik enerji hasatçıları pek çok farklı konfigürasyonda tasarlanmaktadır. Enerji hasatçılardan beklenen kritik özellikler, ana yapının titreşimlerine hızlı cevap verebilmesi, boyutlarının ve ağırlığının düşük olmasıdır. Bu yüzden genelde ince ve düz şekle sahip yapılar tercih edilmektedir. Literatürde kiriş, disk, diyafram (zar), kabuk, yüzük ve S-şeklinde tasarlanan enerji hasatçıları bulunmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalarda temel amaçlar, hasatçı üzerine verilen bir giriş kuvvetine karşı piezoelektrik malzemenin cevabını maksimum düzeye çıkarmak, gerilme yığılmalarını düşürerek hasatçının sağlamlığını arttırmak, sistemde sönümlemeden dolayı oluşan kayıpları minimum seviyeye indirmek ve hasatçının üretilebilirliğini arttırmak üzerinedir [21].

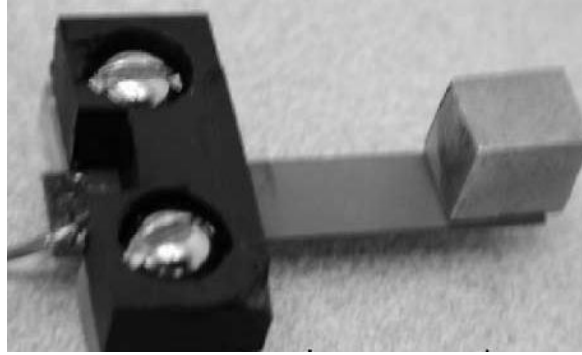
En çok kullanılan piezoelektrik enerji hasatçı tipi kiriş yapısıdır. Piezoelektrik kirişlerin avantajı üretiminin kolay olması ve titreşim sırasında büyük miktarda mekanik deformasyonun sağlanmasıdır. Literatürde tek örtülü ve iki örtülü olmak üzere iki farklı piezoelektrik kiriş yapısı kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemenin piezoelektrik özellik göstermeyen bir malzemeyle birleştirilmesi ve bir kenarının sabitlenmesi sonucunda tek örtülü yapı meydana gelmektedir. Eğer piezoelektrik olmayan malzeme iki katman piezoelektrik malzeme arasına sıkıştırılırsa iki örtülü yapı oluşmaktadır. İki örtülü yapı enerji hasatçının güç çıkışının iki katına

çıkmasını sağlamaktadır ve literatürde en sık kullanılan hasatçı tipidir. Tek örtülü ve iki örtülü yapılar Şekil 2.4'te gösterilmektedir [21], [23], [17], [24].



Şekil 2.3. Tek örtülü ve iki örtülü kiriş tipi enerji hasatçı

İki örtülü piezoelektrik enerji hasatçı Roundy ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Şekil 2.5). Çelik sacın piezoelektrik tabakalar arasına sıkıştırılması ve serbest uca bir kütle konulması ile yapılan çalışmada 120 Hz değerinde frekansta ve 2.25 m/s^2 değerinde ivme girişi altında hasatçıdan $80 \text{ } \mu\text{W} / \text{cm}^3$ güç çıkışı sağlanmıştır [25].



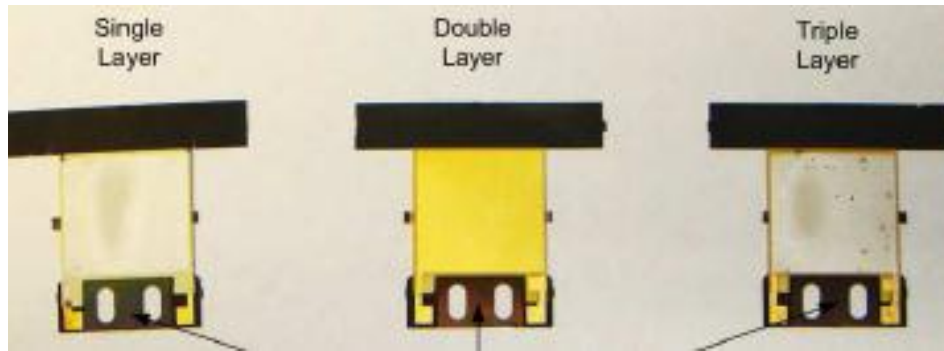
Şekil 2.4. Piezoelektrik iki örtülü kiriş tipi enerji hasadı sistemi [25]

Benzer bir çalışmada ise, Sodano ve çalışma arkadaşları tarafından piezoelektrik kiriş tipi uyarıcı kullanılarak (MIDE Technology QP40N) frekans taraması ve akım ölçümü (farklı frekans ve yük değerlerinde) testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). Test sonuçları analitik model ile karşılaştırılmıştır. MIDE Teknoloji firması tarafından bu çalışma referans alınarak 113 Hz frekansta ve 9.8 m/s^2 değerinde ivme altında $12.7 \text{ } \mu\text{W} / \text{cm}^3$ güç çıkışı sağlayan hasatçı (Quickpack) üretilmiştir [26].



Şekil 2.5. Piezoelektrik iki örtülü enerji hasatçı (MIDE QP40N) test düzeneği [26]

Zhu ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise, çok katmanlı piezoelektrik malzemeler kullanılarak geliştirilen hasatçı tipleri üzerinde çalışılmıştır (Şekil 3.7). Bu çalışmada tekli, ikili ve üçlü piezoelektrik katman kullanılarak aynı toplam katman kalınlığında tasarlanan yapılar için açık devre voltaj değerleri ve güç çıkış değerleri karşılaştırılmıştır. Tek katmanlı hasatçının açık devre voltaj değeri iki katmanlı hasatçıdan 1.94 kat ve üç katmanlı hasatçıdan 2.7 kat daha fazla elde edilmiştir. 2.84 m/s^2 ivme ve 64.5 Hz frekans değerinde titreşim altında gerçekleştirilen testte en yüksek güç çıkışı iki katmanlı yapıdan ($97.9 \text{ } \mu\text{W}$) elde edilmiştir [27].



Şekil 2.6. Tek, iki ve üç katmanlı piezoelektrik enerji hasatçılar [27]

Titreşim tabanlı bir piezoelektrik enerji hasatçının verimliliği ve güç yoğunluğu frekansa bağlıdır. Piezoelektrik malzeme rezonans frekansında maksimum güç üretir. Bu yüzden enerji hasat edilecek ana yapının doğal frekansı göz önünde bulundurularak piezoelektrik elemanın boyutlarının belirlenmesi gerekir. Çizelge 2,5'te birçok farklı titreşim kaynağının doğal frekansları sıralanmıştır. Genel olarak yüksek frekans uygulamalarında (200 Hz ve üzeri) hem piezoelektrik özelliklerinin daha iyi olması, hem de üretiminin yüksek frekans eşleşmesi için daha uygun

olması sebebiyle piezoelektrik seramik malzemeler kullanılırken, düşük frekans uygulamalarında ise, düşük yoğunluğa ve esnekliğe sahip olan piezoelektrik polimerler tercih edilmektedir [21], [22], [28], [25].

Çizelge 2.5. Bazı titreşim kaynakları doğal frekans değerleri [21]

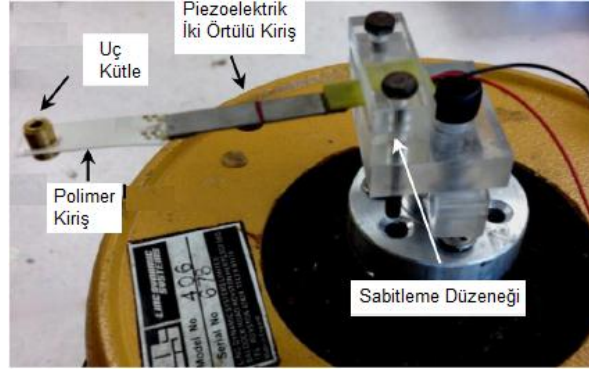
Titreşim Kaynağı	Genlik (m/s ²)	Frekans- (Tepe Değer) (Hz)
Otomobil motor bölümü	12	200
3 eksenli makine aleti tabanı	10	70
Mikser kasası	6.4	121
Çamaşır kurutma makinesi	3.5	121
Topuğu üstünde zıplayan insan	3	1
Otomobil ölçü paneli	3	13
Kapı kapandıktan sonra kapı çerçevesi	3	125
Küçük mikrodalga fırın	2.5	121
Binadaki havalandırma menfezi	0.2-1.5	60
Sıkışık trafiğe sahip yolun yanındaki pencereler	0.7	100
Bilgisayar CD'si	0.6	75

2.3.1. Frekans Ayarlama Metodu

Hasatçının doğal frekansının ana yapının doğal frekansına eşleştirilmesi ile piezoelektrik elemandan maksimum güç elde edilmektedir. Bir enerji hasadı sisteminin doğal frekansı sistemin rijitlik katsayısına ve efektif kütesine bağlıdır. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile hasatçının doğal frekansının optimize edilmesi gereklidir.

Literatürde en çok kullanılan teknikler, sisteme ayrı bir kütle eklemek veya yapının boyutlarını değiştirmek yoluyla hasatçının rezonans frekansının tahrik frekansına ayarlanmasıdır. Stewart ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kiriş tipi hasatçının serbest ucuna doğru yükün akması ve burada kalan piezoelektrik katmanın enerji üretimine katkısının olmaması sebebiyle hasatçıda enerji kaybı olduğu gösterilmiştir [29]. Bu çalışmadan yola çıkan Dhakar ve çalışma arkadaşları piezo-seramik (PZT) yapıdaki kiriş polimer bir malzeme kullanarak serbest uç tarafından uzatmış ve uç kütle yerleştirerek doğal frekans değerini 125 Hz'ten 36 Hz'e düşürmüştür (Şekil 2.8). Bu sayede piezoelektrik malzemenin daha verimli kullanılması ve uç noktanın titreşimlerinden maksimum enerji elde edilmesi

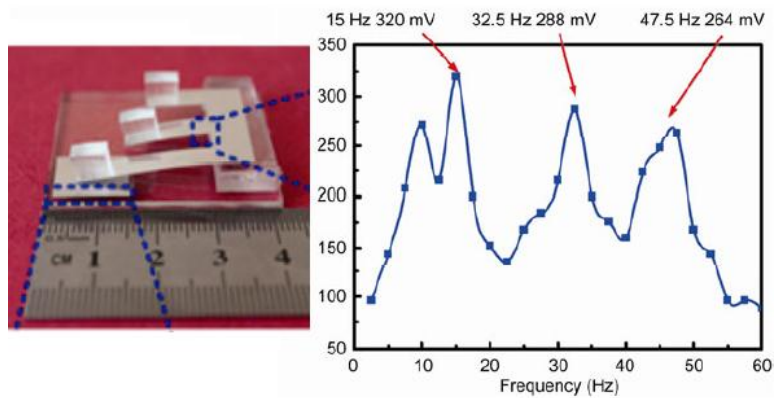
sağlanmıştır. 0.1 g ivme tahrik altında hasatçı tarafından üretilen güç çıkışı % 32 artmıştır [30].



Şekil 2.7. Piezoelektrik enerji hasatçı tasarımı [30]

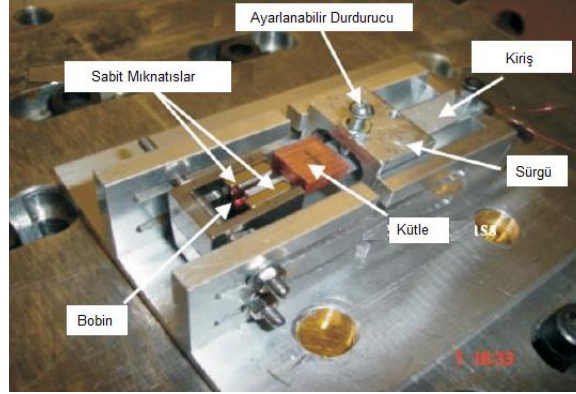
2.3.2. Bant Genişliği Arttırma Metodu

Özellikle gelişigüzel titreşimlere sahip titreşim kaynaklarından yüksek verimle enerji hasat edilebilmesi için hasatçının etkin olduğu bant genişliğinin arttırılması gerekmektedir. Bu kapsamda literatürde kullanılan tekniklerden biri enerji hasatçıların bir dizi şeklinde kullanılmasıdır. Han ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada düşük frekanslı ve geniş bant aralığındaki titreşimler için piezoelektrik ve triboelektrik tabanlı hibrid bir enerji hasadı sistemi tasarlanmış, üretilmiş ve testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.9). Bu çalışmada farklı uzunluklara sahip üç adet PVDF kiriş bir araya getirilerek sabitlenmiştir. Her bir kirişin doğal frekansı uçlarına bağlanan kütleler aracılığıyla farklı değerlere (15, 30 ve 45 Hz) ayarlanmıştır. Bu sayede geniş bant aralığında enerjinin hasat edilmesi amaçlanmıştır. Sisteme 1g ivme değerinde ve 0 - 60 Hz frekans aralığında titreşim uygulanarak frekans taraması testi gerçekleştirilmiş ve yapının voltaj çıkış değerleri ölçülmüştür [31].



Şekil 2.8. Piezoelektrik enerji hasatçı prototipi ve test sonuçları [31]

Enerji hasatçının geniş bant aralığında etkin olması için literatürde kullanılan bir diğer teknik mekanik durduruculara sahip kiriş tipi tasarımıdır. Bu tasarımda amaç, kiriş salınımları sırasında durdurucunun pozisyonunu yanal veya dikey yönde değiştirerek yeni bir kontak noktası yaratmak ve hasatçının etkin olduğu frekans aralığını genişletmektir [32]. Soliman ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada mekanik durdurucu ile kiriş arasındaki dikey uzaklık azaldığında hasatçının bant genişliğinin artması sağlanmıştır (Şekil 2.10) [33].



Şekil 2.9. Piezoelektrik enerji hasatçı tasarımı [33]

2.3.3. Geometrik Modifikasyon Metodu

Kiriş tipi enerji hasatçı tasarımları üzerine literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Birçok araştırmacı maksimum gerinim ve güç çıkışına sahip değişken boyutlara sahip kiriş tasarımları üzerinde çalışmıştır. Hasat edilen enerjinin maksimum seviyeye çıkarılması için dikdörtgen kiriş tasarımları yerine, üçgen veya yamuk şeklinde tasarlanan kiriş tipi hasatçılar kullanılarak, kiriş üzerindeki gerinim dağılımının daha eşit miktarda olması amaçlanmıştır. Bu sayede kiriş üzerindeki gerinim miktarı maksimum seviyeye çıkarılmıştır [34], [35], [36]. Park ve çalışma arkadaşları kiriş tipi bir piezoelektrik enerji hasatçıdan elde edilen güç çıkışının maksimum seviyeye çıkarılması için tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, piezoelektrik bir kirişin uç noktasına belirli bir deplasmanda (0.69 mm) ve frekans aralığında (10-800 Hz) uygulanan tahrik altında farklı tasarımdaki hasatçılardan elde edilen güç çıkış değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.11). Deney sonuçlarında, uç noktasında daha geniş yüzey alanına sahip hasatçının (Tasarım 2) maksimum seviyede güç ürettiği gösterilmiştir. Ayrıca yamuk tasarıma sahip hasatçının (Referans) dikdörtgen yapıdaki hasatçıdan (Tasarım 0) ve optimize edilen hasatçının (Tasarım 1) ise

2.4. Piezoelektrik Polimer Malzemeler ile Enerji Hasadı Uygulamaları

Günümüzde piezoelektrik özellik gösteren ve enerji hasadı uygulamalarında en sık kullanılan polimer malzeme PVDF'tir. PVDF'in başlıca avantajları esnek ve düşük yoğunluğa sahip olması, geniş bir frekans aralığında çalışabilmesi (0.001 Hz – 10^9 Hz), düşük akustik direnci olması, yüksek voltaj çıkışına sahip olması (aynı kuvvet tahriki altında piezo seramik malzemeden 10 kat daha fazla), yüksek dielektrik gerilimine sahip olması (75 V / μm), kompleks şekillerde üretilmesi ve ticari yapıştırıcılar ile yapıştırılabilmesi olarak sıralanabilir [39].

Piezoelektrik polimer malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen enerji hasadı uygulamaları çalışma metotlarına göre insan tahrikli hasatçılar, titreşim tabanlı hasatçılar ve diğer hasatçı tipleri olarak üç farklı gruba ayrılabilir. Bu kısımda, literatürde en sık kullanılan piezoelektrik polimer malzeme PVDF ve piezoelektrik seramik malzeme kurşun zirkonat titanat (PZT) ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilen enerji hasadı uygulamalarına değinilecektir.

2.4.1. İnsan Tahrikli Hasatçılar

İnsan bedeni hareketinden vücuda yerleştirilebilir ve giyilebilir elektronik araçlar için enerji hasat edilmesi konusunda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Vücut hareketinin en karakteristik özelliği düşük frekanslı ve yüksek genlikli titreşime sahip olmasıdır [40].

Piezoelektrik enerji hasatçı tasarımlarının insan bedenine müdahale etmeyecek şekilde üretilmesi gereklidir. Bu kapsamda araştırmacılar tarafından ilk çalışma iki örtülü piezo-polimer (PVDF) ve piezo-seramik (PZT) malzemelerin ayakkabı astarına yerleştirilmesi ve insan yürüyüşünden enerjinin hasat edilmesi üzerine yapılmıştır (Şekil 2.13). Bu çalışmada PVDF'ten ortalama 1.1 mW ve PZT'ten ortalama 1.8 mW güç elde edilmiştir [41].



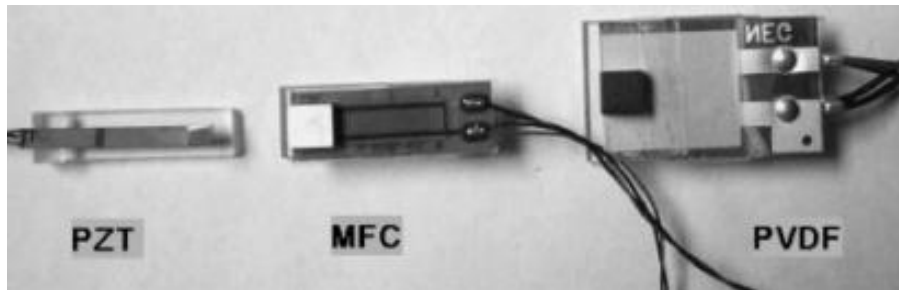
Şekil 2.12. PVDF ve PZT hasatçılar [41]

Schenk ve Paradiso tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise, ayakkabı topuğuna yerleştirilen piezoelektrik seramik ve polimer aynı tahrik kuvveti altında test edilmiş ve PZT seramiğın PVDF polimerden yaklaşık 6.5 kat daha fazla enerji ürettiği gösterilmiştir [42].

Vücuda yerleştirilebilir uygulamalar kapsamında ilk çalışma Hausler ve Stein tarafından, soluk alıp verme sırasında kaburgaların hareketinden PVDF tabakalar aracılığıyla enerji hasat edilmesi konusunda yapılmıştır. Hayvanlar üzerinde yapılan bu çalışmada bir köpeğin kaburgasına PVDF hasatçı sabitlenmiş ve anlık solup alıp verme sırasında 17 μ W güç çıkışı elde edilmiştir [43]. Ramsey ve Clark ise, nabız atması sırasında kan basıncındaki dalgalanmalardan enerji hasat edilmesi konusunda modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirmiş ve yapılan analiz sonuçlarında maksimum 2.3 μ W'lık güç çıkışı sağlanmıştır [44].

2.4.2. Titreşim Tabanlı Hasatçılar

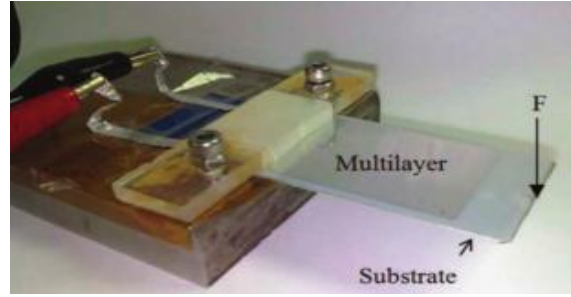
Literatürde seramik ve polimer yapıda piezoelektrik hasatçılar kullanılarak yapılan çalışmalarda genelde seramik yapıdaki piezoelektrik malzemelerin polimer yapıdaki piezoelektrik malzemelerden daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Örneğin, Shen ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yüksek titreşim genlikleri ve ivmeleri altında piezo seramik, polimer ve kompozit hasatçılardan (PZT, PVDF ve MFC) elde edilen güç değerleri ve kırılma mukavemetleri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.14). Güç yoğunlukları değerleri PZT'nin 8600 μ W / cm³, PVDF'in 9 μ W / cm³ ve MFC'nin 17 μ W / cm³ çıkmıştır. Bununla birlikte, beklendiği üzere, kırılma mukavemeti en fazla olan hasatçı tipi ise piezopolimer yapıdaki PVDF olmuştur. Çalışmada PZT'nin 10 g ivme değerinin üstünde hasar göreceği öngörülürken, PVDF ve MFC'nin 100 g üzerinde uygulanan ivme değerlerinde çalışabileceği sonucuna varılmıştır [45].



Şekil 2.13. PZT, MFC ve PVDF enerji hasatçılar [45]

Patel ve çalışma arkadaşları seramik ve polimer yapıdaki piezoelektrik malzemelere frekans taraması ve darbe titreşim testleri gerçekleştirmişlerdir. Frekans taraması testinde iki örtülü PZT enerji hasatlayıcısından 8.374 V (250 μm) ve PVDF enerji hasatlayıcısından ise 0.177 V (28 μm) çıkış ve darbe testi sonucunda, PZT'den yaklaşık 40 V ve PVDF'ten 1V elde edilmiştir [46].

Zhang ve çalışma arkadaşları çok katmanlı yapıya sahip bir piezoelektrik polimer (P(VDF-TrFE)) enerji hasatçının eğilme modu altında performansını araştırmışlardır (Şekil 2.15). 10 katmanlı yapıda üretilen enerji hasatçıdan 50 μJ enerji sağlanmıştır. Çalışmalarında, voltaj ve enerji değerlerinin katman âdeti ile doğru orantılı olarak değiştiğini göstermişlerdir [47].



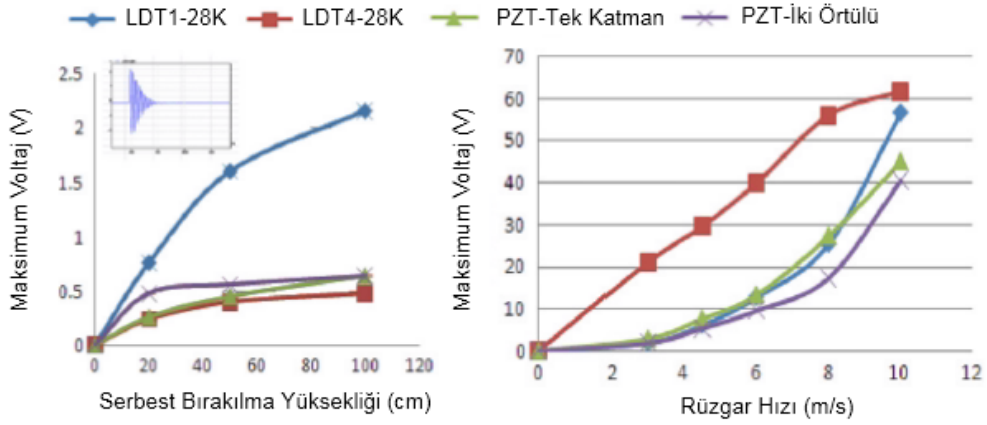
Şekil 2.14. 10 katmanlı P(VDF-TrFE) enerji hasatçısı [47]

2.4.3. Diğer Hasatçı Tipleri

Titreşim tabanlı yapılan çalışmalarda seramik yapıdaki piezoelektrik hasatçının polimer yapıdaki hasatçıdan daha fazla güç ürettiği gösterilmiştir. Vatansever ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, piezoelektrik yapıdaki bir polimerin piezoelektrik seramikten belirli koşullar altında daha fazla voltaj ürettiği kanıtlanmıştır. Bu çalışmada değişken rüzgar hızları ve su damlacıkları altında piezo-seramik (PZT) ve piezo-polimer (PVDF) yapılardan hasat edilebilen enerji miktarları karşılaştırılmıştır (Şekil 2.16). Farklı yüksekliklerden bırakılan 7.5 mg'lık su damlası altında ve farklı rüzgar hızlarında PZT ve PVDF (LDT1-28K ve LDT4-28K) malzemelerden üretilen maksimum voltaj değerleri incelenmiştir. Bu çalışmada, PVDF polimerin PZT seramikten daha fazla voltaj ürettiği gösterilmiştir (Şekil 2.17). Bunun sebebi; seramik malzemenin sertliğinin su damlalarının veya rüzgarın sebep olduğu salınımları engellemesidir. Bu yüzden piezo-seramik malzemenin piezoelektrik özelliği yeteri kadar aktive olmamıştır [48].



Şekil 2.15. Enerji hasadı sistemleri için yağmur ve rüzgar test düzenekleri [48]



Şekil 2.16. Farklı yükseklik ve rüzgâr hızlarına bağlı olarak piezoelektrik malzemelerden üretilen çıkış voltaj değerleri [48]

3. TEORİK MODELLEME

Teorik çalışmalar kapsamında tek ve çok sütunlu yapılarda tasarlanan enerji hasatçılar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde enerji hasatçıların analitik ve nümerik modelleme metotları ve gerçekleştirilen titreşim analizlerinin sonuçları gösterilmektedir.

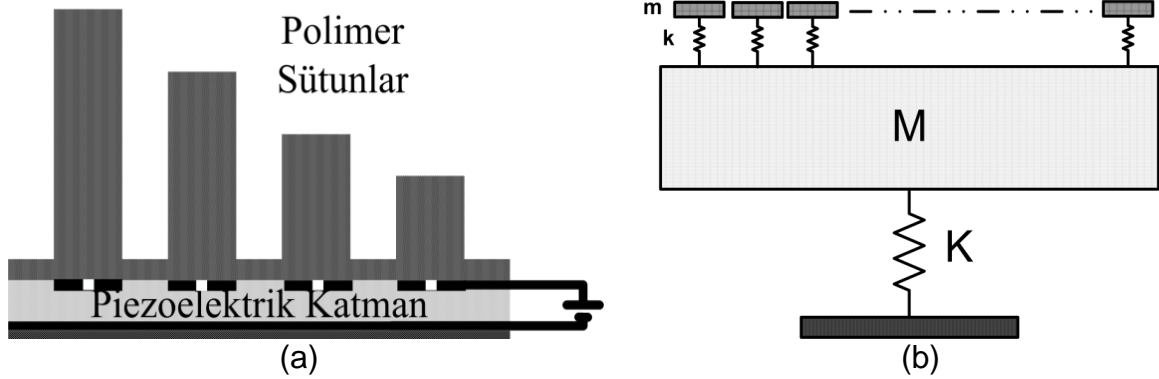
Analitik modelleme çalışması kapsamında tek sütunlu yapının ucunda kütle olduğu ve olmadığı durumlar için tek serbestlik dereceli modeli üzerinde çalışılmıştır. Serbest titreşim ve tabandan uygulanan harmonik ve adım tahrik titreşimleri altında yapının uç noktasının cevabı incelenmiştir. Bunun yanı sıra piezoelektrik malzeme ve viskoelastik sönümlenme modelleri araştırılmıştır. Piezoelektrik malzemelerin elektro-mekanik akuple özelliklere sahip olması sebebiyle çoklu fizik çözümleri sonlu elemanlar metodu ile nümerik model oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Nümerik modelleme kapsamında nümerik çözüm metotları ve modellemeleri için kullanılan teoriler açıklanmıştır. Sonrasında enerji hasadı sistemleri sonlu elemanlar yazılımı (ANSYS Mechanical APDL / Multiphysics) ile iki ve üç boyutlu şekillerde nümerik olarak modellenmiştir. Tek ve çok sütunlu enerji hasadı sistemlerinin birçok farklı konfigürasyonu için (uç kütleli ve kütsüz, farklı arka katman kalınlıkları, malzeme sertlik değerleri, sönümlenme özellikleri, piezoelektrik malzeme kalınlıkları) titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler dâhilinde, modal, harmonik ve geçiş analizleri üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca analitik ve nümerik modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1. Enerji Hasatçının Analitik Modellemesi

Enerji hasatçı temelde polimer sütunlar ve polimer piezoelektrik katmandan oluşmaktadır (Şekil 3.1 (a)). Bu konfigürasyonda, tabandan uygulanan titreşim enerjisi altında, polimer sütunlar osilatörler gibi davranarak titreşim enerjisinin emilmesini sağlarlar (Şekil 3.1 (b)). Sonrasında osilatörler tarafından depolanan elastik enerji piezoelektrik katman üzerinde meydana gelen stres konsantrasyonları aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

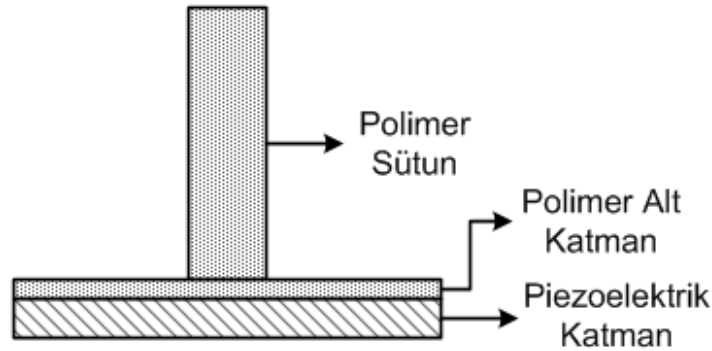
Enerji hasadı sistemi tek ve çok sütunlu yapıda modellenebilir. Teorik çalışma kapsamında, enerji hasatçının tek sütunlu yapıda, ucunda kütle olduğu ve

olmadığı durumlar için tek serbestlik dereceli modeli üzerinde analitik modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir.



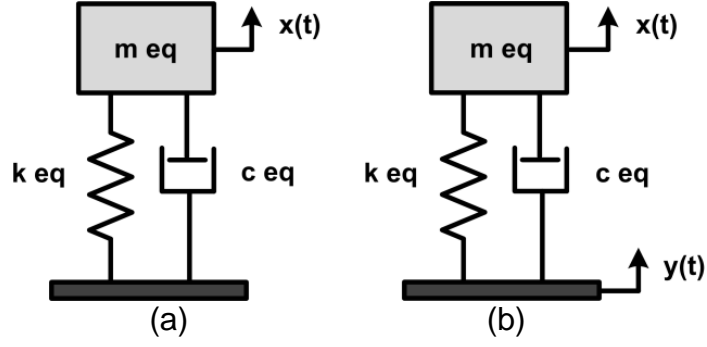
Şekil 3.1. Çok sütunlu piezoelektrik enerji hasadı sistemi modeli

Tek sütunlu yapıda tasarlanan enerji hasatçı polimer sütun, polimer destek katmanı (alt katman) ve piezoelektrik alt katmana sahiptir (Şekil 3.2). Polimer alt katman, polimer sütunun altında piezoelektrik katman ile bağlantı ara yüzünün sağlanabilmesi amacıyla yer almaktadır. Yapıya tabandan uygulanan mekanik titreşimler altında polimer sütunun bu alt katman üzerinde yarattığı mekanik gerilimler sebebiyle piezoelektrik eleman üzerinde bir baskı kuvveti oluşmaktadır. Bu baskı kuvveti piezoelektrik elemanın üst tarafında bulunan elektrotlar aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.



Şekil 3.2. Tek sütunlu piezoelektrik enerji hasadı sistemi modeli

Tek sütunlu piezoelektrik enerji hasadı sistemi tek serbestlik dereceli model kullanılarak modellenebilir. Serbest titreşim ve tabandan uygulanan tahrik titreşimi altında tek serbestlik dereceli modeller Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Tek serbestlik dereceli model, kütle, yay ve sönüm elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Serbest titreşim (a) ve taban tahrik titreşimi (b) altında tek serbestlik dereceli model gösterimi

Yukarıda gösterilen şekilde m_{eq} , k_{eq} ve c_{eq} ankastre kirişin eş değer kütlesi, rijitlik katsayısı ve sönümlenme katsayısını ifade etmektedir. Eş değer rijitlik katsayısı ankastre kirişin ucunda yanal yönde etkiyen yük olduğu durumdaki statik deformasyonundan hesaplanmaktadır. Eş değer kütle ise kirişin uç noktasındaki toplam kinetik enerjisinin Rayleigh's oranı vasıtasıyla kiriş sınır koşulları için tabanın hareket etmediği durumda hız cinsinden ifade edilmesi ile hesaplanmaktadır [49].

Serbest titreşim altında (Şekil 3.2.a) tek serbestlik dereceli modelin hareket denklemi (3.1)'de gösterilmektedir.

$$m_{eq} \ddot{x} + c_{eq} \dot{x} + k_{eq} x = 0 \quad (3.1)$$

Kirişin uç noktasındaki eş değer yanal rijitlik katsayısı (3.2) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$k_{eq} = \frac{3EI}{L^3} \quad (3.2)$$

Bu denklemde E kirişin elastik modülünü, I alan atalet momentini ve L uzunluğunu temsil etmektedir.

Kirişin eş değer kütlesi ise, uç noktasında kütle olmadığı ve olduğu durumlar için sırasıyla (3.3) ve (3.4) denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$m_{eq} = \frac{33}{140} m_{beam} \quad (3.3)$$

$$m_{eq} = \frac{33}{140} m_{beam} + m_{uc} \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde m_{beam} kiriş kütlesini ve m_{uc} uç noktadaki kütle ağırlığını temsil etmektedir.

Yapının sönümsüz doğal frekansı (temel doğal frekansı) uç kütleinin olmadığı ve olduğu durumlar için sırasıyla (3.5) ve (3.6) ile hesaplanmaktadır.

$$w_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{\frac{3EI}{L^3}}{\frac{33}{140}m_{beam}}} \quad (3.5)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{\frac{3EI}{L^3}}{\frac{33}{140}m_{beam} + m_{uc}}} \quad (3.6)$$

Şekil 3.3.b'de taban tahrik titreşimi altında tek serbestlik dereceli model gösterilmiştir. Taban tahriki altında tek serbestlik dereceli modelin hareket denklemleri (3.7)'de gösterilmektedir.

$$m_{eq}\ddot{x} + c_{eq}(\dot{x} - \dot{y}) + k_{eq}(x - y) = 0 \quad (3.7)$$

Tabandan uygulanan harmonik tahrik girişi altında $(y(t))_h = Y_h e^{i\omega t}$ denklem sisteminin çözümü ve uç deplasmanı (3.8)'de verilmiştir.

$$x(t) = \sqrt{\frac{k_{eq}^2 + \omega^2 c_{eq}^2}{(k_{eq} - \omega^2 m_{eq})^2 + (\omega c_{eq})^2}} Y_h e^{i(\omega t - \emptyset)} \quad (3.8)$$

Bu denklemde $x(t)$ kütleinin zamana bağlı mutlak deplasman cevabını, ω tahrik frekansını, Y_h mutlak harmonik taban deplasmanı genliğini ve \emptyset faz açısını göstermektedir. Eğer kütleinin tabana göre bağıl deplasman cevabı $z(t)$ ile ifade edilirse $(z(t) = x(t) - y(t)_h)$ deplasman cevabı denklem (3.9)'da ki şekilde hesaplanmaktadır.

$$z(t) = \frac{\omega^2 m_{eq}}{k_{eq} - \omega^2 m_{eq} + j\omega c_{eq}} Y_h e^{i\omega t} = \frac{\omega^2}{w_n^2 - \omega^2 + j2\xi w_n \omega} Y_h e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

Bu denklemde ξ sönümlenme oranını göstermektedir.

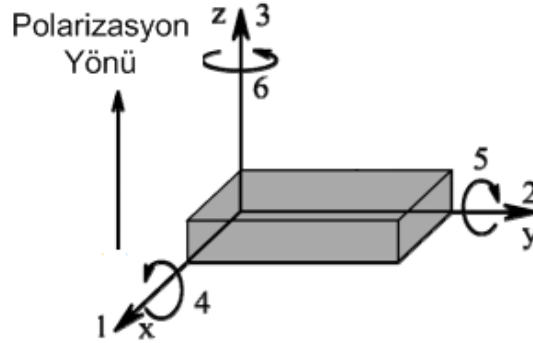
Tabandan adım tahrik girişi uygulandığı durumda ise $y(t)_s = Y_s \delta(t)$ kütleinin zamana bağlı deplasmanı (3.10)'da gösterilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$x(t) = e^{-\xi w_n t} \left[\xi w_n x(0) \cos(w_d t) + \left(\frac{\dot{x}(0) + \xi w_n x(0)}{w_d} \right) \sin(w_d t) \right] + Y_s [u(t) - e^{-\xi w_n t} (\cos(w_d t) + \frac{-\xi w_n}{w_d} \sin(w_d t))] \quad (3.10)$$

Bu denklemde Y_s adım tahrik deplasman genliğini ve w_d sönümlü doğal frekansını göstermektedir.

3.1.1. Piezoelektrik Malzemenin Matematiksel Modeli

Piezoelektrik malzemeler anizotropik özelliğe sahiptir. Yani özellikleri yöne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Piezoelektrik özellikleri ifade edebilmek için Şekil 3.4' te gösterildiği gibi sabit bir eksen kullanmak gereklidir.



Şekil 3.4. Piezoelektrik malzeme için eksen takımı

Şekil 3.4' te, 3 numaralı eksen piezoelektrik malzemenin polarizasyon yönü olarak seçilmiştir. Lineer bir piezoelektrik malzemenin elektromekanik denklemleri (3.11) ve (3.12)'de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

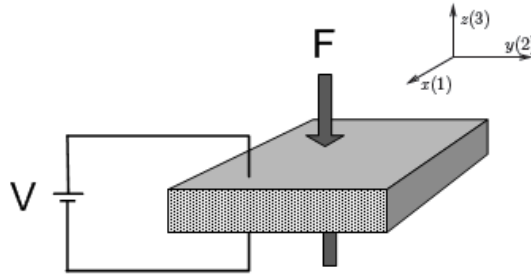
Bu denklemlerde $[S]$ mekanik gerinim matrisini, $[T]$ mekanik gerilme matrisini, $[E]$ elektrik alan matrisini, $[D]$ elektrik yer değiştirme matrisini, s_{ij}^E esneklik katsayısı değerlerini, d_{ij} piezoelektrik modül değerlerini ve ε_{ij} dielektrik sabitlerini göstermektedir. (3.11) numaralı denklem ters piezoelektrik etki modelini gösterirken, (3.12) numaralı denklem direkt piezoelektrik etkiyi göstermektedir. Bunun yanı sıra i ile gösterilen alt simge elektrik alan yönünü ve j ile gösterilen alt simge ise mekanik gerinim veya gerilimin yönünü temsil etmektedir. Piezoelektrik

malzemenin enine izotropik olduğu durumda denklemler (3.13 ve (3.14)'te gösterildiği şekilde indirgenmektedir.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Piezoelektrik malzemeye polarizasyon yönü ile aynı yönde bir kuvvet uygulandığında malzeme “33” modunda kullanılmaktadır. Bu kullanım şekli şematik olarak Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. 33 modunda piezoelektrik malzeme kullanımı

Bu kullanım şekli sonucunda (3.13) ve (3.14) numaralı denklemler basitleştirilerek (3.15) ve (3.16) elde edilmektedir.

$$S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (3.15)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \varepsilon_{33} E_3 \quad (3.16)$$

Belirli bir yük (kuvvet) altında 33 modunda kullanılan piezoelektrik malzemeden elde edilen yük miktarı aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemler yarı statik yükleme durumu için kullanılmaktadır. Bu durum tahrik frekansının piezoelektrik malzemenin rezonans frekansından çok daha düşük olduğu koşul için tanımlanmaktadır.

$$T_3 = \frac{F}{A_p} \quad (3.17)$$

$$E_3 = \frac{V_s}{t_p} \quad (3.18)$$

$$q = D_3 A_p = \left(d_{33} \frac{F}{A_p} + \varepsilon_{33} \frac{V_s}{t_p} \right) A_p = d_{33} F + \frac{\varepsilon_{33} A_p}{t_p} V_s \quad (3.19)$$

Yukarıdaki denklemlerde A_p piezoelektrik elemanın yüzey alanını, t_p kalınlığını, F uygulanan kuvveti, V_s uygulanan potansiyel farkı ve q ise yük miktarını göstermektedir. Piezoelektrik malzeme potansiyel farkı sıfıra eşit olan bir elektrik devresine bağlanırsa, uygulanan kuvvet altında üretilen yük miktarı için (3.20) kullanılmaktadır.

$$q = d_{33} F \quad (3.20)$$

Bu denklemde yer alan d_{33} ise g_{33} piezoelektrik voltaj sabiti, ε_0 boşluğun dielektrik sabiti (8.85×10^{-12} Farads/m) ve $\varepsilon_{3,r}$ bağıl dielektrik katsayısı kullanılarak hesaplanmaktadır (3.21).

$$d_{33} = g_{33} \varepsilon_0 \varepsilon_{3,r} \quad (3.21)$$

Piezoelektrik elemanın kapasitans değeri, C aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır (3.22).

$$C = \frac{\varepsilon_{33} A_p}{t_p} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{3,r} A_p}{t_p} \quad (3.22)$$

Piezoelektrik elemanın mekanik gerilimi ile uygulanan yüklemenden meydana gelen elektrik alan arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$E_3 = g_{33} T_3 \quad (3.23)$$

Piezoelektrik malzeme tarafından üretilen gerilim miktarı, V_p (3.24) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$V_p = \frac{q}{C} = \frac{d_{33} F}{C} = \frac{g_{33} \varepsilon_0 \varepsilon_{3,r} F}{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{3,r} A_p}{t_p}} = \frac{g_{33} F t_p}{A_p} = g_{33} T_3 t_p \quad (3.24)$$

Piezoelektrik elemanın enerji dönüşüm verimi, η (3.25) numaralı denklem kullanılarak hesaplanır [6].

$$\eta = \frac{\frac{k^2}{2(1-k^2)}}{\frac{1}{Q} + \frac{k^2}{2(1-k^2)}} \quad (3.25)$$

Piezoelektrik eleman tarafından hasat edilen elektrik enerjisi ile aktarılan mekanik enerji arasındaki oranın karekökü direkt piezoelektrik etki için elektromekanik kaplin katsayısını, k_{33} belirlemektedir [6].

$$k_{33}^2 = \frac{E_{elek}}{E_{mek}} \quad (3.26)$$

Ayrıca Q kalite faktörünü, yani malzemenin sönümlenme oranı ile ilişkisini göstermektedir. Kalite faktörü (3.27) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (3.27)$$

Piezoelektrik elemandan elde edilen güç çıkışı, P (3.28) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

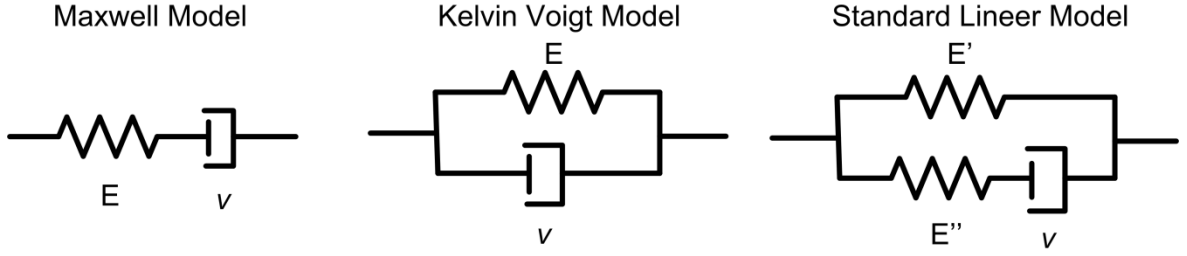
$$P = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (3.28)$$

Bu denklemde V_{rms} rms cinsinden ölçülen voltajı ve R ise piezoelektrik elemanın bağlı olduğu empedans değerini göstermektedir. Piezoelektrik elemandan maksimum enerji hasat edebilmek için empedans eşleştirme önemli bir olgudur. Empedans değeri, R aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$R = \frac{1}{wC} \quad (3.29)$$

3.1.2. Viskoelastik Malzemenin Matematiksel Modeli

Viskoelastik özellik malzemelerin ortak elastik ve viskoz davranışı olarak tanımlanmaktadır. Malzemeye uygulanan dış kuvvet kaldırıldığında malzeme ilk konumuna geri dönüyorsa bu özellik malzemenin elastik davranışı olarak ifade edilmektedir. Eğer malzemeye dış kuvvet uygulandığında malzeme gecikmeli bir şekil değişimine maruz kalıyorsa bu özellik viskoz davranış olarak tanımlanmaktadır. Malzemenin bu davranışını görselleştirmek amacıyla elastik özelliği göstermek için bir yay ve viskoz davranışı simgelemek için bir amortisör (yağ kutusu) kullanılmaktadır. En basit modeller bu elemanların seri ve paralel bir şekilde bağlanmaları aracılığıyla elde edilmektedir. Şekil 3.5'te Maxwell, Kelvin-Voigt ve standart lineer modelleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Viskoelastik malzeme modelleri

Şekil 3.6'da E malzemenin elastik modülünü, v ise viskozitesini göstermektedir. Lineer bir viskoelastik malzeme modelinde kullanılan yay ve yağ kutusunun denklemleri sırasıyla (3.30) ve (3.31)'de verilmektedir.

$$\sigma = E \epsilon \quad (3.30)$$

$$\sigma = v \dot{\epsilon} \quad (3.31)$$

Bu denklemlerde σ uygulanan mekanik gerilimi, ϵ gerinimi, $\dot{\epsilon}$ gerinim hızını göstermektedir. Sabit yük altında, σ_0 , malzemenin zamanla deformasyonunun artması sünme özelliğini, $J(t)$, göstermektedir (3.32). Sabit gerinim altında malzemedeki gerilmenin zamanla azalması ise, gerilme gevşemesi, $E_r(t)$, olarak açıklanmaktadır (3.33).

$$J(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \quad (3.32)$$

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \quad (3.33)$$

Şekil 3.5'te gösterilen modeller arasında hem basit olması, hem de sonlu elemanlar programları içerisinde sıklıkla kullanılması sebebiyle bu çalışma kapsamında Maxwell modeli kullanılmıştır. Tek elemanlı Maxwell modelinin temel denklemleri (3.34)'te verilmektedir.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} \frac{1}{E} + \frac{\sigma}{v} \quad (3.34)$$

Adım giriş fonksiyonu için gerilim cevabı, $\sigma(t)$, ve gerilim gevşemesi, $E(t)$, cevabı sırasıyla (3.35) ve (3.36)'da gösterilmektedir. Zamana bağlı gerilim gevşemesinin Laplace dönüşümünden kompleks modül elde edilmektedir (3.37).

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\left(\frac{Et}{v}\right)} \quad (3.35)$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} = E e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}, \quad \tau = \frac{v}{E} \quad (3.36)$$

$$\tilde{E}(i\omega) = \frac{i\omega E\tau}{(1+i\omega\tau)} \quad (3.37)$$

Yukarıdaki denklemlerde τ gevşeme zamanını göstermektedir. N elemanlı Maxwell modelinin birbirine bağlanması ile genelleştirilmiş Maxwell modeli elde edilmektedir. Bu modelin gerilim gevşemesi $E(t)$ ve kompleks modülü $\tilde{E}(i\omega)$ sırasıyla (3.38) ve (3.39) ile hesaplanmaktadır.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)} \quad (3.38)$$

$$\tilde{E}(i\omega) = E_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{i\omega E_n \tau_n}{(1+i\omega\tau_n)} \quad (3.39)$$

Yukarıdaki denklemlerde E_∞ saf elastik elemanın modülünü temsil etmektedir.

3.2. Enerji Hasatçının Nümerik Modellemesi

Piezoelektrik malzemelerin elektro-mekanik akuple özelliklere sahip olması sebebiyle çoklu fizik çözümleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu metot, mühendislik probleminin sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrıştırılması ve her eleman için denklem takımlarının çözülmesi esasına dayanmaktadır. Bu kapsamda, piezoelektrik enerji hasatçı modellemesi için sonlu elemanlar analiz programı olarak ANSYS Mechanical APDL / Multiphysics kullanılmıştır. Bu yazılım elastik, piezoelektrik veya viskoelastik malzemelerin modellemelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kısımda, öncelikle nümerik çözüm metotları ve modellemeleri için kullanılan teoriler açıklanmaktadır. Sonrasında ise, sırasıyla tek ve çok sütunlu yapıların çoklu fizik titreşim analizlerinin sonuçları gösterilmektedir. Ayrıca analitik ve nümerik sonuçların karşılaştırılmalı sonuçlarına da bu bölümde değinilmektedir.

3.2.1. Nümerik Çözüm Metotları ve Analiz Tipleri

Birinci dereceden lineer denklem sistemlerinin nümerik olarak çözüm işlemi direkt veya iterasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda (3.40)'ta gösterilen denklem sisteminin çözümü için uygun olan metot, denklem sisteminin büyüklüğüne, katsayılar matrisinin yapısına, çözüm süresine, çözümden beklenen hassasiyete veya kullanılan bilgisayarın özelliklerine bağlıdır. Genel olarak denklem sisteminin küçük olması (serbestlik derecesi < 10000) durumunda direkt metotların kullanılması uygundur. Fakat denklem sistemleri büyük ve katsayılar matrisinin seyrek olduğu durumlarda direkt metotlar çok fazla bellek,

işlem ve hesap süresi gerektirebilirler. Bu durumda iterasyon yöntemlerinin kullanılması ve yuvarlama hatalarının önüne geçilmesi gerekmektedir. Fakat aynı zamanda iterasyon yöntemlerinin yakınsamaması ihtimali de mevcuttur.

$$[A] \{x\} = \{B\} \quad (3.40)$$

Bu denklemde $[A]$ katsayılar matrisini, $\{B\}$ karşı taraf vektörünü ve $\{x\}$ bilinmeyenler vektörünü göstermektedir.

Bu kapsamda ANSYS programında lineer denklem sistemlerinin çözümü için Frontal ve Sparse direkt metotları ile PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) ve JCG (Jacobi Conjugate Gradient) iterasyon metotları kullanılmaktadır. Bu metotların kullanım alanları Çizelge 3,1'de verilmiştir. Direk çözüm metotları (3.40)'ta gösterilen katsayılar matrisinin bir üst üçgen ve bir alt üçgen matrislerinin çarpımı şeklinde ayrıştırılması ve bu matrislerin sırasıyla kullanılarak bilinmeyenler vektörünün hesaplanması esasına dayanmaktadır. İterasyon metotları ise, bilinmeyenler vektörü için bir başlangıç değerinin tahmin edilmesi ve durdurma koşulu sağlanıncaya kadar iteratif bir şekilde çözümün tekrarlanması işlemlerini içermektedir. Ayrıca lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümünde ise, iteratif bir metot olan Newton-Raphson metodu uygulanmaktadır.

Çizelge 3.1. Denklem sistemi çözüm metotları [50]

Çözüm Metodu	Kullanım Alanı	Model Boyutu (DOF)
Frontal (Direkt)	Lineer olmayan analizlerde, belleğin sınırlı olduğu durumda	< 50k
Sparse (Direkt)	Lineer olmayan analizlerde, iteratif yöntemlerin yavaş yakınsadığı lineer analizlerde	10k - 500k
PCG (İteratif)	Çözüm hızının önemli olduğu analizlerde, büyük modellerde, gerçek simetrik matrislerde	50k - 1000k+
ICCG (İteratif)	Çoklu fizik uygulamalarında, diğer iteratif yöntemlerin yakınsamadığı durumlarda, gerçek ve gerçek olmayan simetrik ve asimetrik matrislerde	50k - 1000k+
JCG (İteratif)	Çözüm hızının önemli olduğu tek alanlı (termal, manyetik, akustik gibi) problemlerde, gerçek ve gerçek olmayan simetrik ve asimetrik matrislerde	50k - 1000k+

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz tipleri statik, modal, geçiş ve harmonik analizler olarak sıralanmaktadır. Her bir analiz çeşidinde kullanılan denklem sistemi ve çözüm metodu farklılık göstermektedir.

Yapının statik analizinde her bir eleman için tanımlanan denklem sistemi (3.41)'de gösterilmektedir. Bu denklem (3.42)'de gösterildiği şekilde yüke maruz kalan ve kalmayan serbestlik dereceleri için ayrıştırılabilir. Bu metotta eylemsizlik ve sönümlenme etkileri ihmal edilmektedir.

$$[K] \{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} [K_{cc}] & [K_{cs}] \\ [K_{cc}]^T & [K_{ss}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{u_c\} \\ \{u_s\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{F_c^a\} \\ \{F_s^a\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \{F_c^r\} \\ \{F_s^r\} \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

Bu denklemlerde $\{u\}$ yer değiştirme cevap vektörünü, $\{F^a\}$ toplam uygulanan kuvvet vektörünü, $\{F^r\}$ tepki kuvvet vektörünü, s alt indisi maruz kalan serbestlik derecesini ve c alt indisi maruz kalmayan serbestlik derecesini göstermektedir.

Yapıların doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi amacıyla modal analizinin gerçekleştirilmesi gereklidir. Modal analiz problemi için (3.43)'te gösterilen denklem sistemi çözülmektedir.

$$[K] \{\Phi_i\} = \lambda_i [M] \{\Phi_i\} \quad (3.43)$$

Bu denklemde $\{\Phi_i\}$ öz vektörleri ve λ_i öz değerleri göstermektedir. Denklem çözülmesi için ANSYS programının önerdiği Block Lanczos, PCG Lanczos, alt uzay, asimetrik, sönümlü, QR sönümlü metotları uygulanabilir.

Geçiş analizleri kapsamında her bir eleman için tanımlanan lineer denklem sistemi (3.44)'te gösterilmektedir.

$$[M] \{\ddot{u}(t)\} + [C] \{\dot{u}(t)\} + [K] \{u(t)\} = \{F^a(t)\} \quad (3.44)$$

Bu denklemde $\{\ddot{u}(t)\}$ ivme vektörünü, $\{\dot{u}(t)\}$ hız vektörünü, $\{u(t)\}$ yer değiştirme vektörünü, $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ yapısal sönümlenme matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{F^a(t)\}$ uygulanan yük vektörünü göstermektedir. Bu denklem sistemlerinin çözülmesi için Newmark veya genelleştirilmiş HHT- α algoritmaları içerisinde tanımlanan tam ve mod süper pozisyon metotları kullanılabilir.

Geçiş analizlerinde gerçekleştirilecek analizin doğruluğu seçilen zaman adımına bağlıdır. Zaman adımı küçüldükçe, çözümün doğruluğu artmaktadır. Fakat çözüm süresi uzamaktadır. Bu yüzden optimum bir zaman adımının belirlenmesi

gereklidir. Yapının tüm modlarının birleşimi dinamik cevabı oluşturduğundan, belirlenen zaman adımının cevaba katkısı olan en yüksek modun etkisini içermesi gereklidir. Bu kapsamda Newmark algoritması için zaman adımı (3.45)'te belirtilen denklem kullanılarak hesaplanmaktadır. Bunun yanı sıra seçilen zaman adımının uygulanan kuvvet fonksiyonunu izleyecek derecede küçük olması gereklidir. Adım yükleme koşulunda zaman adımı (3.46)'da verilen denklem ile hesaplanabilir.

$$TS = \frac{1}{20f} \quad (3.45)$$

$$TS = \frac{1}{180f} \quad (3.46)$$

Burada TS zaman adımını, f ise en yüksek modal frekansı göstermektedir.

Gerçekleştirilen dinamik analizlerde sistemdeki sönümlenmenin etkisinin de belirlenmesi gereklidir. Bu kapsamda en sık kullanılan sönümlenme şekli Rayleigh sönümlenme çeşididir. Bu sönümlenme şeklinde alfa ve beta sönüm katsayılarının belirlenmesi gereklidir. Bu katsayılar malzemenin sönümlenme oranı kullanılarak hesaplanmaktadır (3.47). Sonrasında 3.48'de gösterilen denklem kullanılarak sönümlenme matrisi oluşturulmaktadır.

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2w_i} + \frac{\beta w_i}{2} \quad (3.47)$$

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3.48)$$

Yukarıdaki denklemlerde α ve β sönüm katsayılarını, $[C]$ ise sönüm matrisini göstermektedir. Bunun yanı sıra analiz tipine uygun olarak programda yer alan diğer sönümlenme şekilleri kullanılarak (direkt, malzemeye bağlı, modal, eleman sönümlenme) sönümlenme etkisi belirlenebilir.

Harmonik analiz kapsamında her bir eleman için tanımlanan lineer denklem sistemi ise (3.49) ve (3.50)'de gösterilmektedir. Denklem sisteminin çözümü için tam ve mod süper pozisyon metotları kullanılabilir.

$$([K] - \Omega^2[M] + i\Omega[C])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = \{F_1\} + i\{F_2\} \quad (3.49)$$

$$\{u\} = (\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\Omega t}, \{F\} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\Omega t} \quad (3.50)$$

Piezoelektrik tabanlı gerçekleştirilen analizlerde her bir eleman için Allik ve Hughes tarafından türetilen birleşik sonlu eleman matris denklemleri (3.51)'de verilmektedir [50].

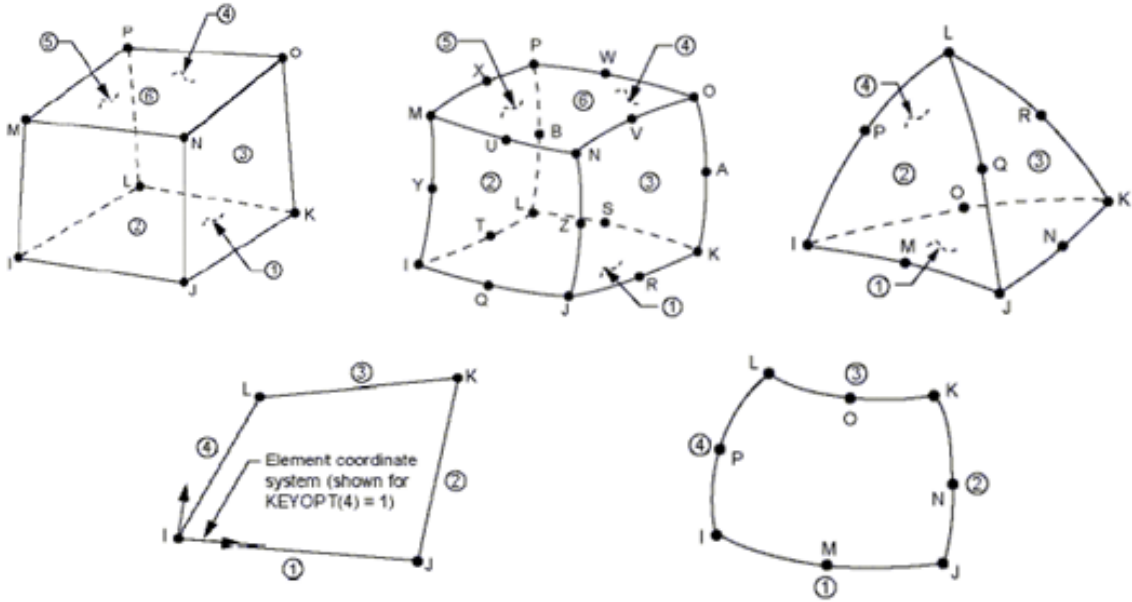
$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{v}\} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & -[C^{vh}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{v}\} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^Z] \\ [K^Z]^T & -[K^d] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{F\} \\ \{L\} + \{L^{th}\} \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

Bu denklemde $\{v\}$ elektrik potansiyeli cevap vektörünü, $[C^{vh}]$ dielektrik sönümlenme matrisini, $[K^Z]$ piezoelektrik kaplin matrisini, $[K^d]$ dielektrik geçirgenlik katsayı matrisini, $\{F\}$ düğüm ve yüzey kuvvet vektörünü, $\{L\}$ düğüm ve yüzey yük vektörünü ve $\{L^{th}\}$ ise termo-piezoelektrik yük vektörünü göstermektedir.

ANSYS programında piezoelektrik davranışa sahip olan altı farklı eleman tipi kullanılmaktadır. Bu eleman tipleri Çizelge 3.2'de ve geometrik şekilleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. ANSYS programında kullanılan piezoelektrik elemanlar

Eleman	Tip	Nod Sayısı
SOLID5	Tuğla	8
SOLID226	Tuğla	20
SOLID98	Dört yüzlü	10
SOLID227	Dört yüzlü	10
PLANE13	Dörtkenarlı	4
PLANE223	Dörtkenarlı	8

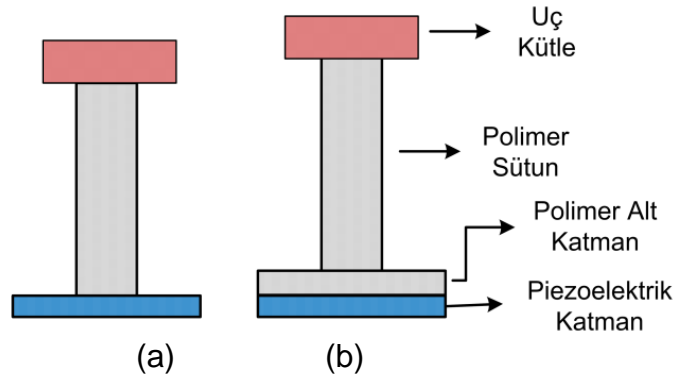


Şekil 3.7. Piezoelektrik elemanların geometrik şekilleri [50]

3.2.2. Tek Sütunlu Yapının Titreşim Analizi

3.2.2.1. Modelleme

Tek sütunlu yapının titreşim analizi kapsamında ucunda kütle olan ve olmayan konfigürasyonlar için iki farklı yapı modellenmiştir. Bununla birlikte polimer sütunun arka katman kalınlığının etkisinin araştırılması amacıyla farklı kalınlıklarda arka katmana sahip olan modeller üzerinde de çalışılmıştır. Bu yapılar sırasıyla Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Polimer alt katmanı (a) olan ve (b) olmayan uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sistemi modelleri

Enerji hasadı sistemi analizlerinde kullanılan yapılar üç boyutlu (3D) ve iki boyutlu (2D) şekilde modellenerek titreşim analiz çalışmalarının karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Öncelikle yapıda bulunan her bir parçanın eleman tipi seçilmiştir. Piezoelektrik film için SOLID98 (3D) ve PLANE13 (2D) elemanlar, polimer sütun için SOLID185 (3D) ve PLANE183 (2D) elemanlar, uç kütle için ise SOLID45 (3D) ve PLANE183 (2D) elemanlar kullanılmıştır. Piezoelektrik eleman seçiminde elemanın hem deplasman, hem de voltaj serbestlik derecesine sahip olmasına dikkat edilmiştir. Polimer sütun için seçilen elemanlar viskoelastik davranışı desteklemektedir. Uç kütle ise, literatürde sıklıkla kullanılan eleman tiplerinden seçilmiştir.

Her bir yapının malzeme özellikleri belirlenerek ilgili eleman tiplerine atanmıştır. Piezoelektrik film malzemesi olarak PVDF [39], polimer sütun malzemesi olarak polidimetilsiloksan (PDMS) [51] ve uç kütle malzemesi için çelik seçilmiştir. Piezoelektrik malzemenin esneklik, piezoelektrik modül ve dielektrik sabit değerleri, viskoelastik malzemenin sönümlenme özellikleri ve çeliğin elastik modül, Poisson oranı, yoğunluk bilgileri Çizelge 3.3, 3.4 ve 3.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. PVDF malzeme özellikleri [39]

PVDF	Kısaltma	Değer	Birim
Poisson oranı	v_p	0.29	
Yoğunluk	ρ	1800	kg / m ³
Piezoelektrik esneklik katsayıları	$c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{22}, c_{23}, c_{33}, c_{44}, c_{55}, c_{66}$	3.2, 1.9, 1, 3.2, 1, 1.2, 0.9, 0.9, 2.6	C/m ² (10 ⁹)
Piezoelektrik gerilim katsayıları	$e_{31}, e_{32}, e_{33}, e_{24}, e_{15}$	0.024, 0.024, -0.027, 0.001, 0.001	
Dielektrik geçirgenlik katsayıları	$\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$	7.6, 7.6, 12	F / m

Çizelge 3.4. PDMS malzeme özellikleri (3D) [51]

PDMS	Kısaltma	Değer	Birim
Elastik Modülü	E	1.5	Pa (10 ⁶)
Poisson oranı	v_p	0.499	
Yoğunluk	ρ	970	kg / m ³
Gerilme gevşemesi katsayıları	E_1, E_2, E_3	0.0142, 0.0203, 0.0308	Pa (10 ⁶)
Gevşeme zamanları (1/ τ)	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	1, 10, 100	

Çizelge 3.5. Çelik malzeme özellikleri

Çelik	Kısaltma	Değer	Birim
Elastik Modülü	E	200	Pa (10 ⁹)
Poisson oranı	v_p	0.3	
Yoğunluk	ρ	7860	kg / m ³

Sonrasında her bir malzemenin geometrik özellikleri atanmıştır. Bu değerler yapının üretilebilir olması dikkate alınarak belirlenmiştir. Sistem uç kütleli / uç kütsüz ve iki / üç boyutlu şekillerde modellenmiştir. Yapıların geometrik özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Yapıların geometrik özellikleri

Parça	Malzeme	Geometri (mm)
Piezoelektrik Katman	PVDF	20 (genişlik) 20 (uzunluk) 0.028 (kalınlık)
Polimer Sütun	PDMS	10 (çap) 30 (uzunluk)
Polimer Alt Katman	PDMS	20 (uzunluk) 20 (genişlik) 1 (kalınlık)
Uç Kütle	Çelik	10 (iç çap) 16 (dış çap) 4 (kalınlık)

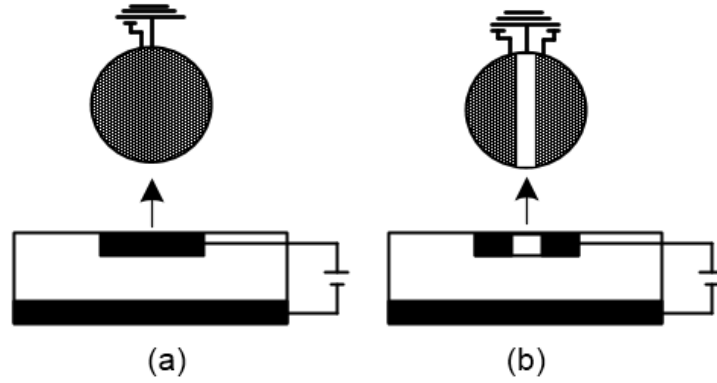
Elemanlara ayırma işlemi her bir yapı için sırasıyla gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu analizde dörtkenarlı elemanlar ve üç boyutlu analizde altı yüzlü elemanlar kullanılmıştır. Yapılarda herhangi keskin veya açılı bir kenar olmadığı için tüm yapının eleman yoğunluğu aynıdır. Sadece piezoelektrik katman kalınlığının düşük olması sebebiyle daha küçük eleman kullanılmıştır. Eleman boyutu analitik sonuçlar ile yapılan karşılaştırma ve çözücünün çözüm süresi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Her bir yapının elemanlara ayırma işlemi özellikleri ile düğüm ve eleman sayıları, Çizelge 3.7’de verilmektedir.

Çizelge 3.7. Elemanlara ayırma işlemi özellikleri

Özellik	Koşul			
	Uç Kütsesiz		Uç Kütleli	
	2D	3D	2D	3D
Eleman Boyutu (PDMS/Çelik)	0.001	0.0005	0.001	0.0005
Eleman Boyutu (PVDF)	125e-7			
Eleman Tipi	Dörtkenarlı	Altı yüzlü	Dörtkenarlı	Altı yüzlü
Düğüm Sayısı	1640	52644	1852	58432
Eleman Sayısı	604	184516	668	214780

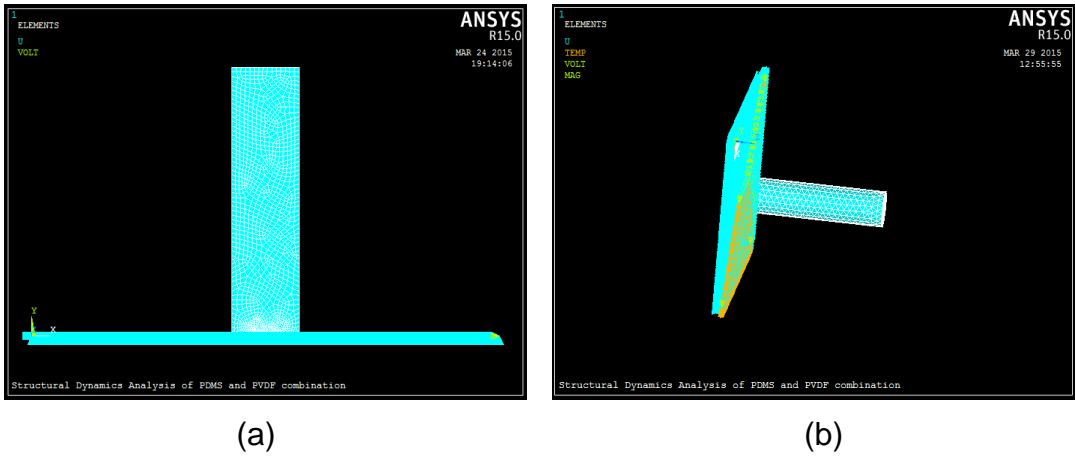
Elemanlara ayırma işlemi sonrasında sisteme ait sınır koşulları belirlenmiştir. Piezoelektrik katmanın alt yüzeyine sabit sınır koşulu uygulanmıştır. Bununla birlikte piezoelektrik filmin alt ve üst yüzeylerinde elektrotlar tanımlanmıştır. Üstte yer alan elektrotlar, sırasıyla tam ve iki yarım elektrot konfigürasyonlarında kullanılmıştır. Elektrotlar PDMS polimer sütunun alt ara yüzüne denk gelecek

şekilde yerleştirilmiştir. Piezoelektrik filmin alt yüzünde ise, tamamını kaplayacak şekilde tek adet elektrot kullanılmıştır. Elektrot konfigürasyonları Şekil 3.9'da gösterilmektedir.

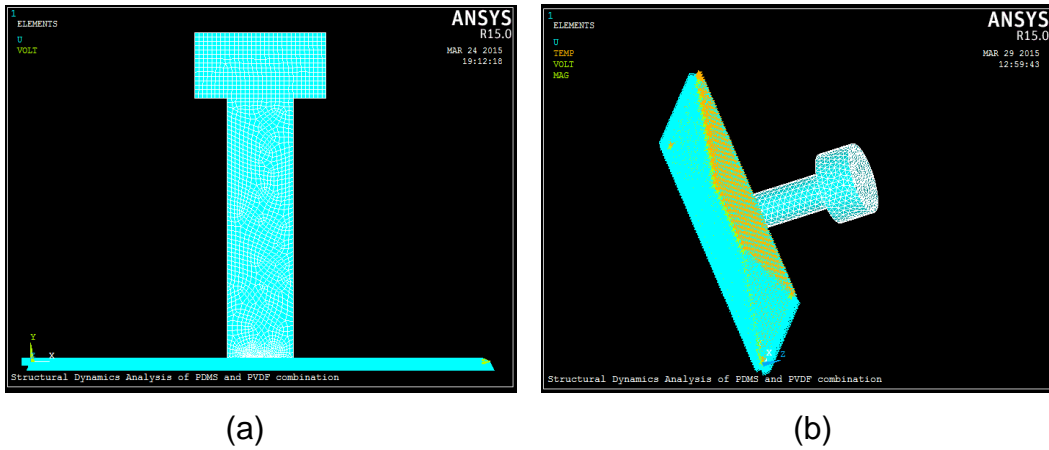


Şekil 3.9. Piezoelektrik filmin (a) tam ve (b) yarım elektrot konfigürasyonları

Ucunda kütle olmayan ve olan yapıların sonlu eleman modelleri sırasıyla Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Uç kütsüz tek kirişli yapının (a) 2 ve (b) 3 boyutlu modelleri



Şekil 3.11. Uç kütleli olan tek kirişli yapının (a) 2 ve (b) 3 boyutlu modelleri

3.2.2.2. Modal Analiz

Yapıların sönümsüz doğal frekanslarının belirlenmesi amacıyla modal analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde en sık kullanılan metot olması sebebiyle modal analiz metodu olarak Block Lanczos seçilmiştir. Şekil 3.10 ve 3.11’de gösterilen sınır koşulları sırasıyla ucunda kütle olmayan ve olan modeller için uygulanmıştır. Piezoelektrik malzemenin alt yüzünde tanımlanan elektrota 0V uygulanmıştır. Aynı zamanda malzemenin alt ara yüzü tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiştir. Polimer sütunun uç noktası ise serbest haldedir. Modal analiz sonucunda yapının ilk 5 modu çıkarılmıştır. Çizelge 3.8’de ucunda kütle olmayan ve olan durumlar için ilk 5 modun doğal frekans değerleri ve mod şekilleri listelenmektedir. Yapıya eklenen uç kütle doğal frekans değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Yapının ilk modu yanal yönde eğilme modu olarak görünmektedir.

Çizelge 3.8. Ucunda kütle olmayan ve olan durumlar için doğal frekans değerleri

Mod Numarası	Uç Kütsüz (Hz)	Uç kütleli (Hz)	Mod Şekli
1	74.511	34.267	Yanal yönde titreşim-Mod-1
2	338.44	164.67	Yanal yönde titreşim-Mod-2
3	387.74	169.65	Dikey yönde titreşim-Mod-1
4	742.64	385.59	Yanal yönde titreşim-Mod-3
5	1131.2	678.47	Yanal yönde titreşim-Mod-4

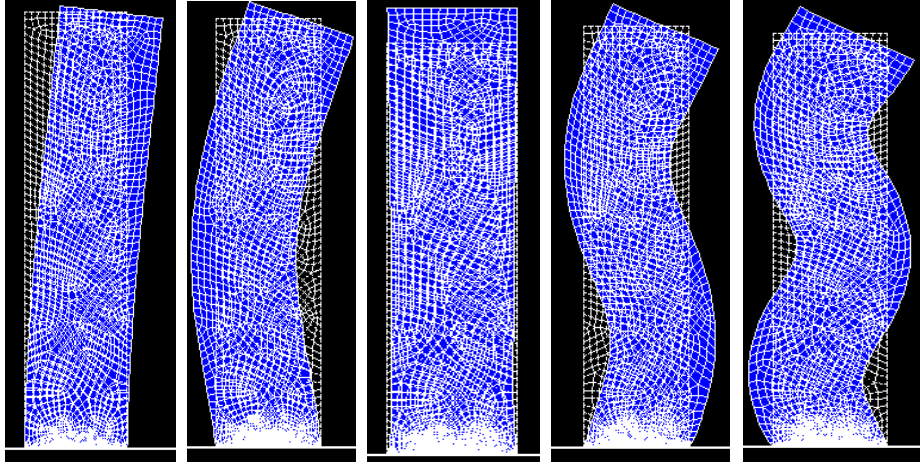
Ucunda kütle olmayan ve olan durumlar için iki boyutlu ve üç boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.9. İki boyutlu ve üç boyutlu modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

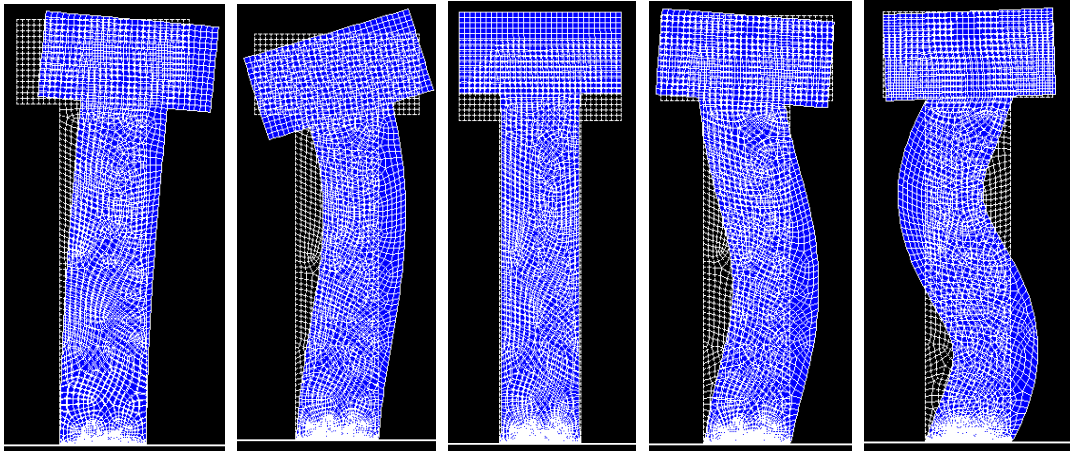
Mod Numarası	Uç Kütsüz (Hz) (2D)	Uç Kütsüz (Hz) (3D)	Uç Kütleli (Hz) (2D)	Uç Kütleli (Hz) (3D)
1	73.648	74.511	34.267	36.711
2	337.55	338.44	164.67	177.53
3	369.99	387.74	169.65	178.69
4	741.88	742.64	385.59	398.98
5	1099.5	1131.2	678.47	702.91

Bu karşılaştırma sonucunda zaman tabanlı analizlerin çözümünün daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla iki boyutlu modelleme tekniği kullanılarak analizlere devam edilmesine karar verilmiştir. İki boyutlu analizler

sonucunda ucunda kütle olmayan ve olan durumlar için elde edilen mod şekilleri sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Ucunda kütle olmayan yapının (2D) ilk 5 mod şekli



Şekil 3.13. Ucunda kütle olan yapının (2D) ilk 5 mod şekli

Polimer arka katman kalınlığının yapının ilk doğal frekansına etkisini araştırmak amacıyla farklı arka katman kalınlıkları için yapının ilk doğal frekansı hesaplanmıştır (Çizelge 3.10). Arka katman kalınlığının artışı ile doğru orantılı olarak yapının doğal frekans değerinde düşme meydana gelmektedir.

Çizelge 3.10. Farklı arka katman kalınlıkları için modal analiz sonuçları

Arka Katman Kalınlığı (mm)	Uç Kütsüz (Hz) (2D)	Uç Kütleli (Hz) (2D)
0	73.648	34.267
1	70.196	33.232
2	67.669	32.693
3	65.775	32.237
5	63.142	32.583

Yapının nümerik model kullanılarak hesaplanan doğal frekans değerleri (birinci modu) ile teorik değerler Çizelge 3.11'de karşılaştırılmıştır. Bu tabloda nümerik sonuçların uç kütsesiz yapı için % 0.51 ve uç kütleli yapı için % 0.53 hata ile hesaplandığı gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Nümerik ve analitik doğal frekans değerleri

Doğal Frekans (1.mod)	Teorik (Hz)	Nümerik (Hz)	Hata (%)
Uç Kütsesiz	74.031	73.648	0.51
Uç Kütleli	34.450	34.267	0.53

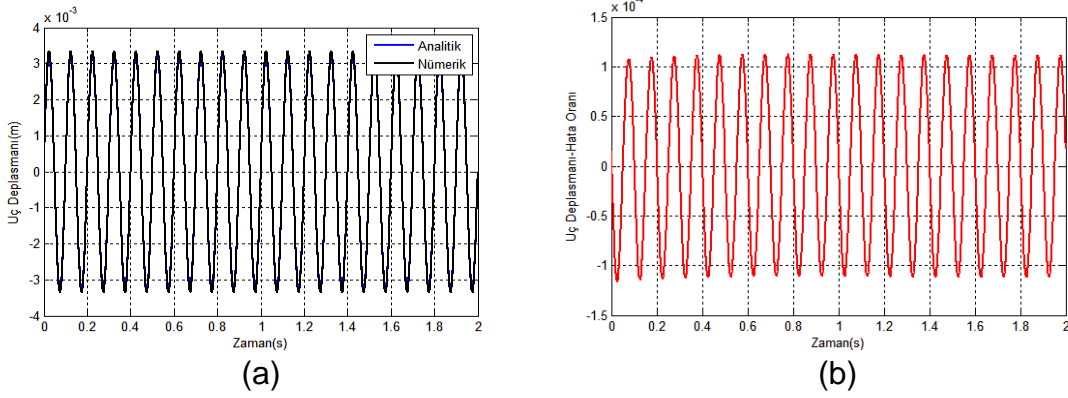
3.2.2.3. Harmonik Tahrik Altında Yapının Titreşim Analizi

Harmonik titreşim analizi yapıya sinüzoidal değişen bir yük uygulandığında yapının kararlı hal cevabını belirlemek için gerçekleştirilmektedir. Literatürde en sık kullanılan metot olması ve her tip yükün uygulanabilmesi sebebiyle harmonik analiz çözücü olarak tam metot seçilmiştir. Sınır koşulları için öncelikle piezoelektrik malzemenin alt yüzünün serbestlik derecelerinin tamamı 0 olacak şekilde tanımlanmıştır. Üst yüzeyinde ise, Şekil 3.8'de gösterildiği üzere voltaj serbestlik dereceleri tanımlanmıştır. Zaman aralığı (3.45) ve (3.46)'da gösterilen denklemler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Çizelge 3.12).

Çizelge 3.12. Uç kütsesiz ve kütleli yapıların analizinde kullanılan zaman adımları

Harmonik Analiz	Zaman Adımı (s)
Uç Kütsesiz	0.0005
Uç Kütleli	0.001

Harmonik tahrik altında yapının titreşim analizi kapsamında öncelikle analitik ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uç kütleli yapıya (Şekil 3.10) tabandan yanal yönde 1g büyüklüğünde, 10 Hz değerinde frekansta, 2s boyunca harmonik deplasman uygulanmıştır. Yapının uç noktasının zamana bağlı olarak analitik (Denklemler 3.8) ve nümerik cevabı Şekil 3.14 (a)'da gösterilmektedir. Ayrıca zamana bağlı olarak hata eğrisi çıkarılmış (Şekil 3.14 (b)) ve yüzde hata değeri % 3.23 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.14. Harmonik titreşim altında yapının uç noktasının analitik ve nümerik cevabı (a) ve hata eğrisi (b)

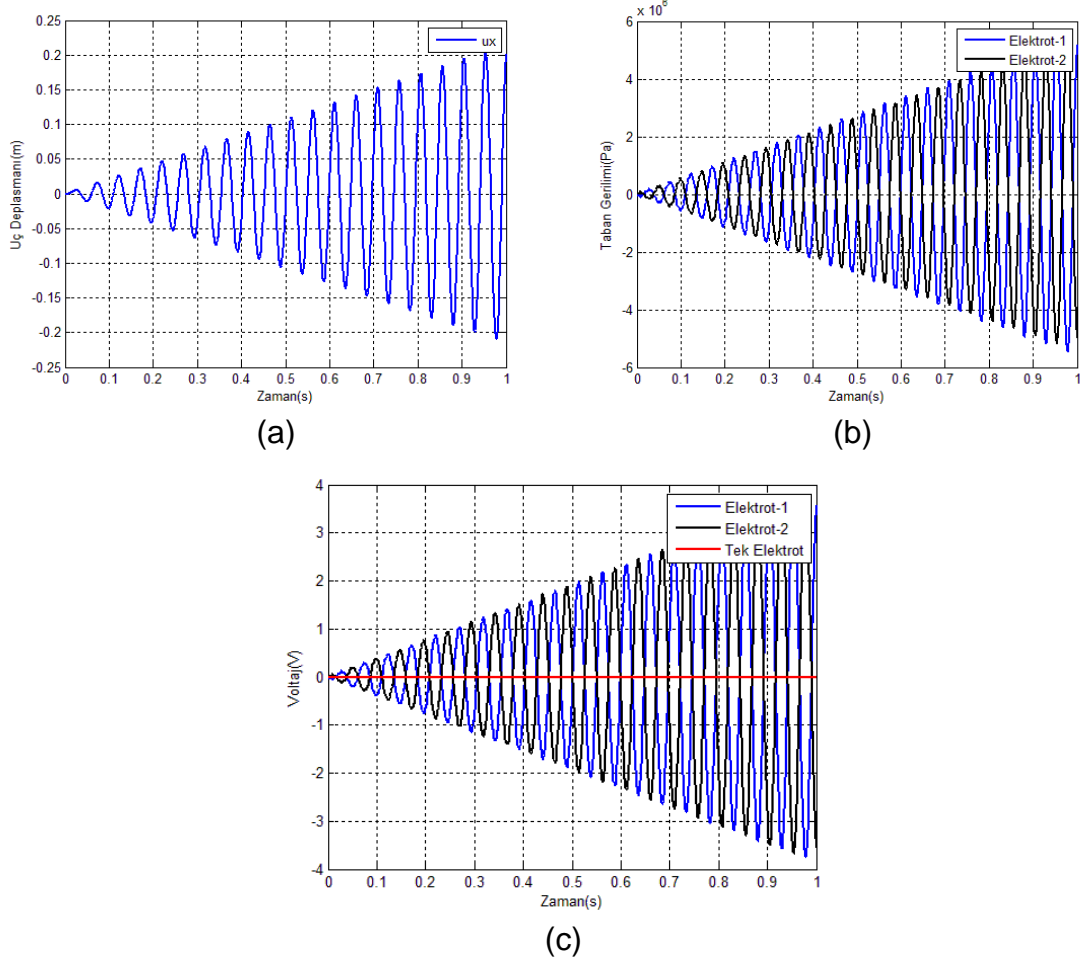
Gerçekleştirilen nümerik analizler kapsamında birçok farklı koşul için enerji hasatçının cevabı incelenmiştir. Harmonik tahrik kuvveti yapıya tabandan yanal yönde (3 g genliğinde) ve yapının birinci doğal frekansında (rezonans frekansı) zamana bağlı olarak uygulanmıştır. Simülasyonlar sonucunda genel olarak uç noktanın deplasman eğrileri, tabanda oluşan gerilim eğrileri ve elektrotlardan elde edilen voltaj eğrileri çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar Çizelge 3.13'te özetlenmektedir. Analiz sonuçları her bir farklı koşul için ayrı incelenmiştir.

Çizelge 3.13. Harmonik tahrik titreşimi altında gerçekleştirilen analiz çalışmaları

Koşul	Analiz Başlığı
1	Uç kütleli yapının titreşim analizi ve farklı elektrot konfigürasyonlarının (Şekil 3.8) etkisinin incelenmesi
2	Ucunda kütle olmayan ve olan yapıların karşılaştırmalı analizi
3	Farklı polimer alt katman kalınlıklarına sahip olan uç kütleli yapıların karşılaştırmalı analizi
4	Ucunda kütle olan yapının sönümlü (Rayleigh) ve viskoelastik sönümlü konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi
5	Ucunda kütle olan yapının sönümlü (Rayleigh) ve sönümsüz konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi
6	Farklı kalınlıklara sahip PVDF filmlere sahip enerji hasatçılarının karşılaştırmalı analizi
7	Farklı sertlik değerine sahip olan polimer sütunların karşılaştırmalı analizi

İlk tip analizde ucunda kütle olan yapı için yanal yönde 1 s süre boyunca rezonans frekansında uygulanan harmonik taban tahriki altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda uç noktanın yer değiştirmesi ve farklı elektrot

konfigürasyonları için tabanda meydana gelen gerilim ve voltaj çıktısı eğrileri incelenmiştir. Yapıya tabandan yanal yönde titreşim uygulandığında, polimer sütun ile piezoelektrik katman arasında eğilme gerilimleri oluşmaktadır. Bu gerilimler polimer sütunun nötr eksenine göre bir tarafta basma ve diğer tarafta çekme gerilimine sebep olmaktadır. Bu durum hem her iki tarafın yüzeyinde oluşan gerilimler arasında, hem de iki taraf için ayrı tanımlanmış elektrotlardan elde edilen voltaj çıktıları arasında 180°'lik faz farkına yol açmaktadır. Bu yüzden piezoelektrik elemanın üst yüzeyinde tek elektrot kullanıldığı durumda toplam voltaj değeri 0 V olarak elde edilmektedir. Analiz sonucunda piezoelektrik katman üzerinde yarı elektrot konfigürasyonu kullanılarak voltaj çıktılarının ayrılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 3.15'te gösterilmektedir.

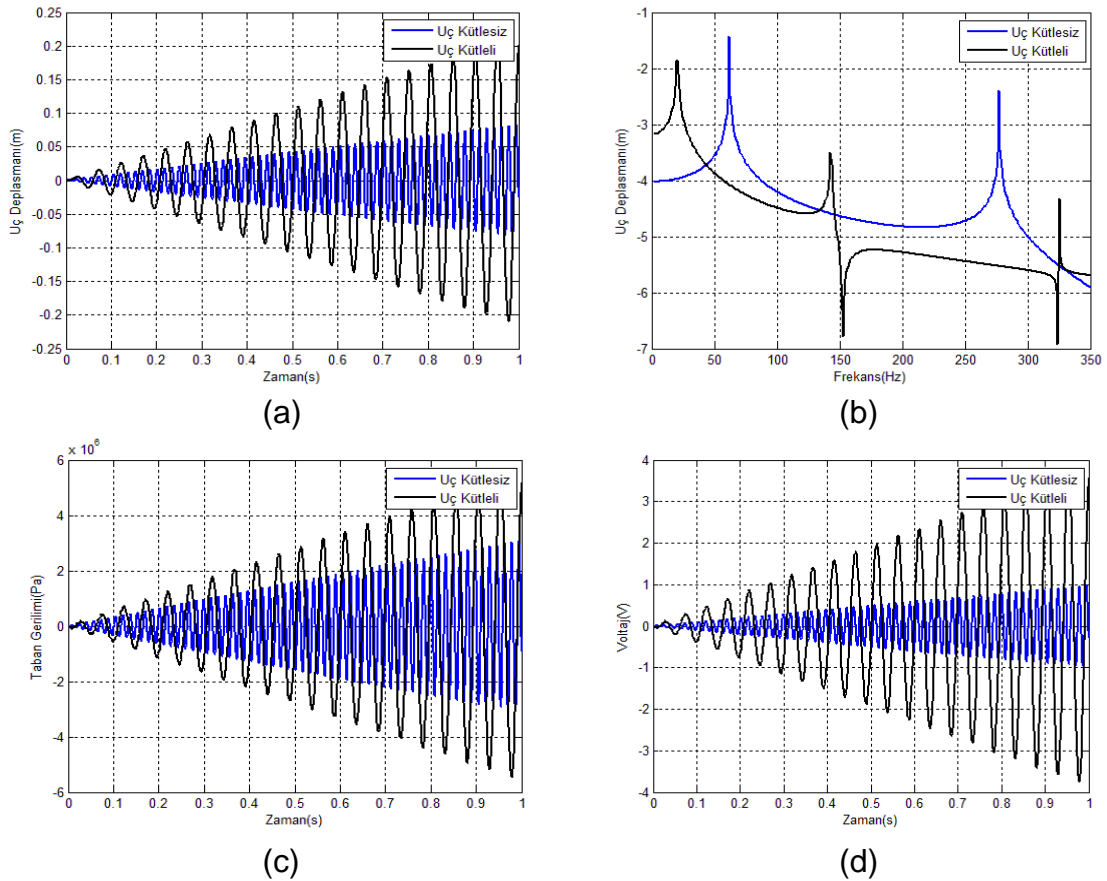


Şekil 3.15. Uç kütleli yapının yanal yöndeki uç deplasmanı (a), farklı elektrotlardan elde edilen taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

Şekil 3.15 (a)'da yapının uç noktasının yanal yöndeki titreşimleri yapıya rezonans frekansında tahrik uygulandığını göstermektedir. Şekil 3.15 (b) ve (c)'de iki ayrı konfigürasyon için (Şekil 3.9) tabanda dikey yönde oluşan gerilmeler ve

elektrotlardan elde edilen voltaj çıktıları gösterilmektedir. Bu kapsamda, piezoelektrik katman üzerindeki elektrotların yarım elektrot konfigürasyonunda kullanılmasına karar verilmiştir. Bundan sonra çalışma içerisinde kullanılacak olan voltaj çıktısı değerleri sadece bir yarım elektrottan alınarak elde edilmiştir.

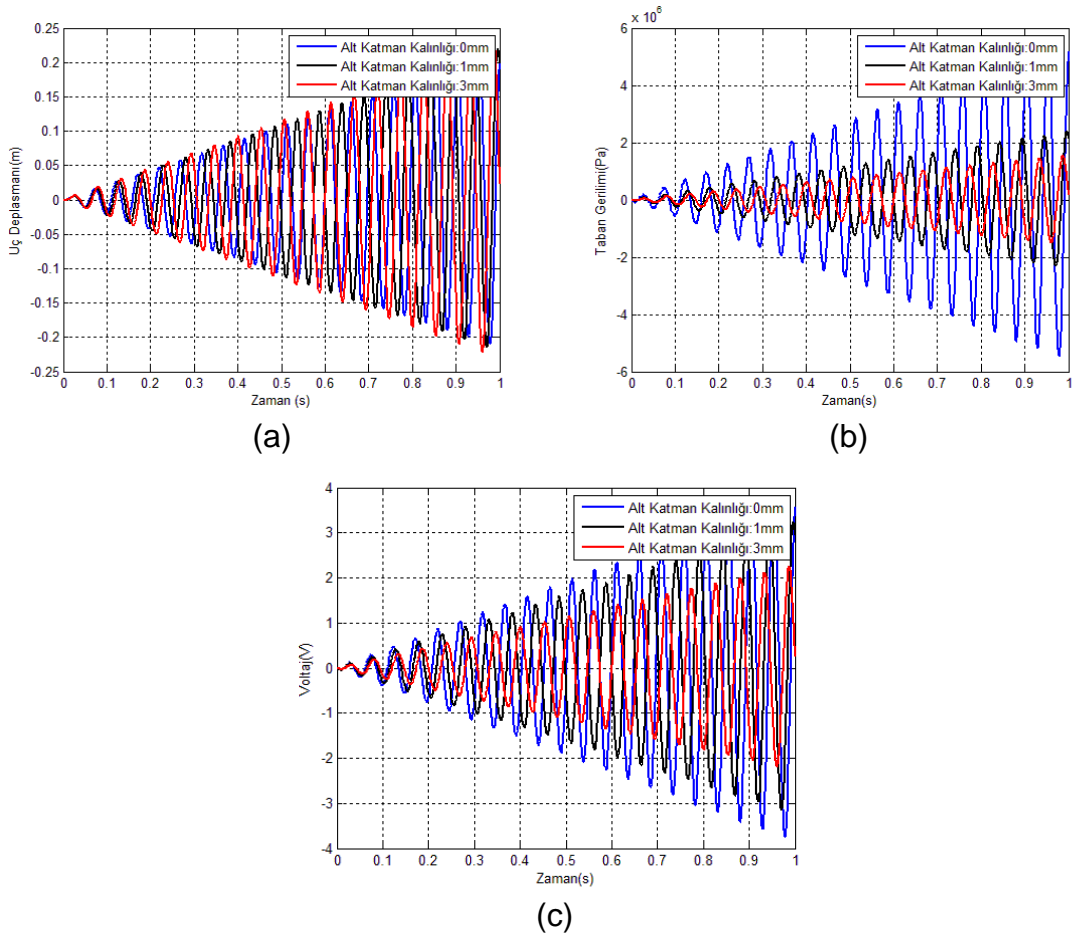
İkinci tip analizde, uç noktanın yanal yöndeki yer değiştirmesi (Şekil 3.16 (a), (b)) zaman ve frekans tabanlarında, tabanda dikey yönde oluşan gerilim (Şekil 3.16 (c)) ve piezoelektrik filmde alınan voltaj çıktısı değerleri (Şekil 3.16 (d)) ise zaman tabanında, ucunda kütle olan ve olmayan yapılar için karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarında, uca eklenen kütle yapının doğal frekansını düşürdüğü ve aynı zamanda salınımların genliğini arttırdığı görülmektedir. Bu yüzden, düşük frekanslı titreşimler için tasarlanan enerji hasadı sistemlerinde uç kütle kullanılmaktadır.



Şekil 3.16. Uç kütleli ve kütsüz yapıların zaman tabanında uç deplasmanı (a), frekans tabanında uç deplasmanı (b), taban gerilimi (c), voltaj çıktısı (d)

Üçüncü tip analizde, farklı polimer alt katman kalınlıklarına sahip olan uç kütleli yapıların karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. 0 mm, 1 mm ve 3 mm

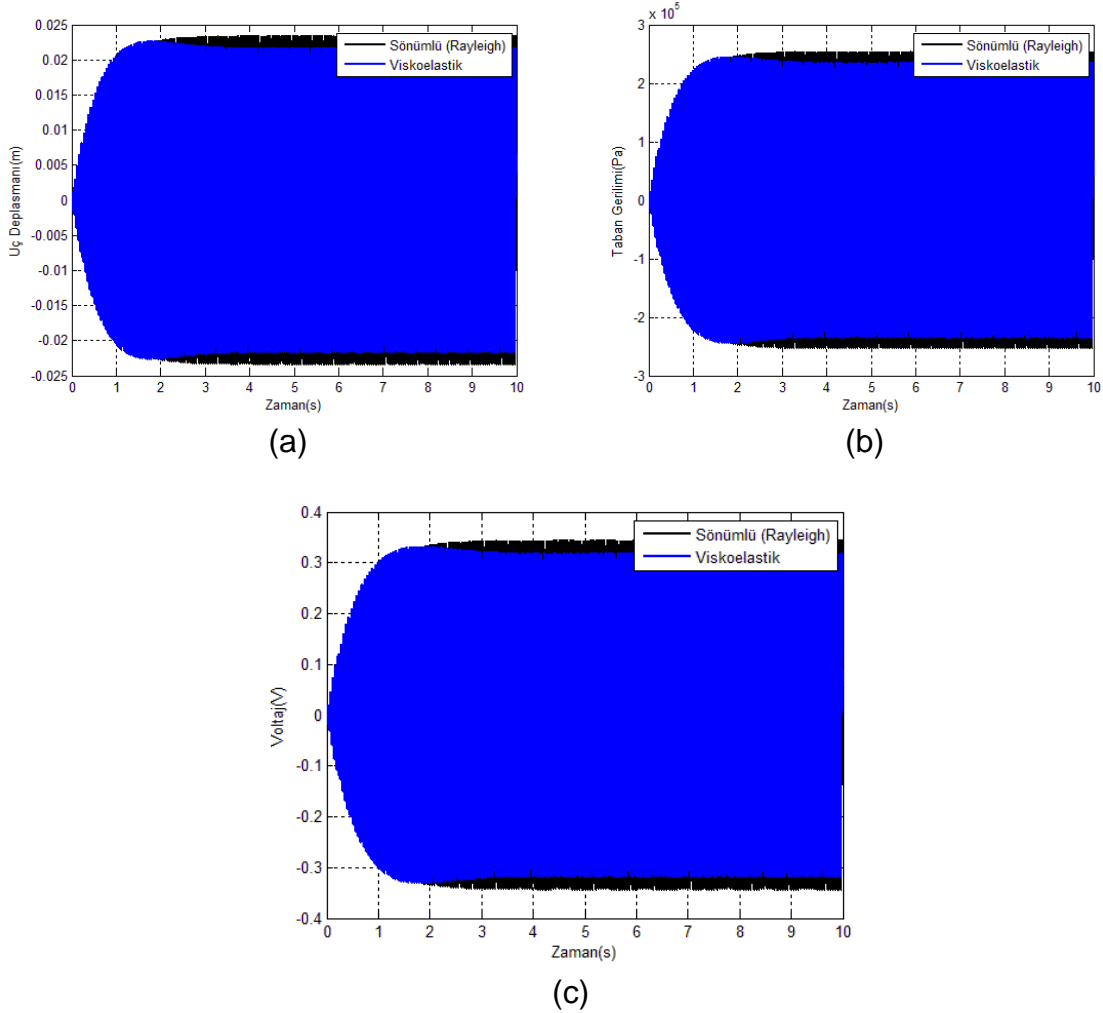
kalınlığında alt katmana sahip olan enerji hasatçılarının uç deplasmanları (Şekil 3.17 (a)), taban gerilmeleri (Şekil 3.17 (b)) ve voltaj çıktıları (Şekil 3.17 (c)) incelenmiştir. Şekil 3.17 (a)'da alt katman kalınlığı artışının yapının doğal frekans değerinin değişmesine ve düşmesine sebep olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, Şekil 3.17 (b) ve (c)'de alt katman kalınlığı arttıkça piezoelektrik katmana transfer edilen titreşim enerjisinin düşmesinden dolayı tabanda oluşan gerilmenin ve voltaj çıktısı değerinin düştüğü gözlenmektedir. Bu yüzden polimer yapının alt katman kalınlığının üretim işlemi sırasında minimize edilmesi gereklidir.



Şekil 3.17. Uç kütleli yapının farklı alt katman kalınlıkları için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

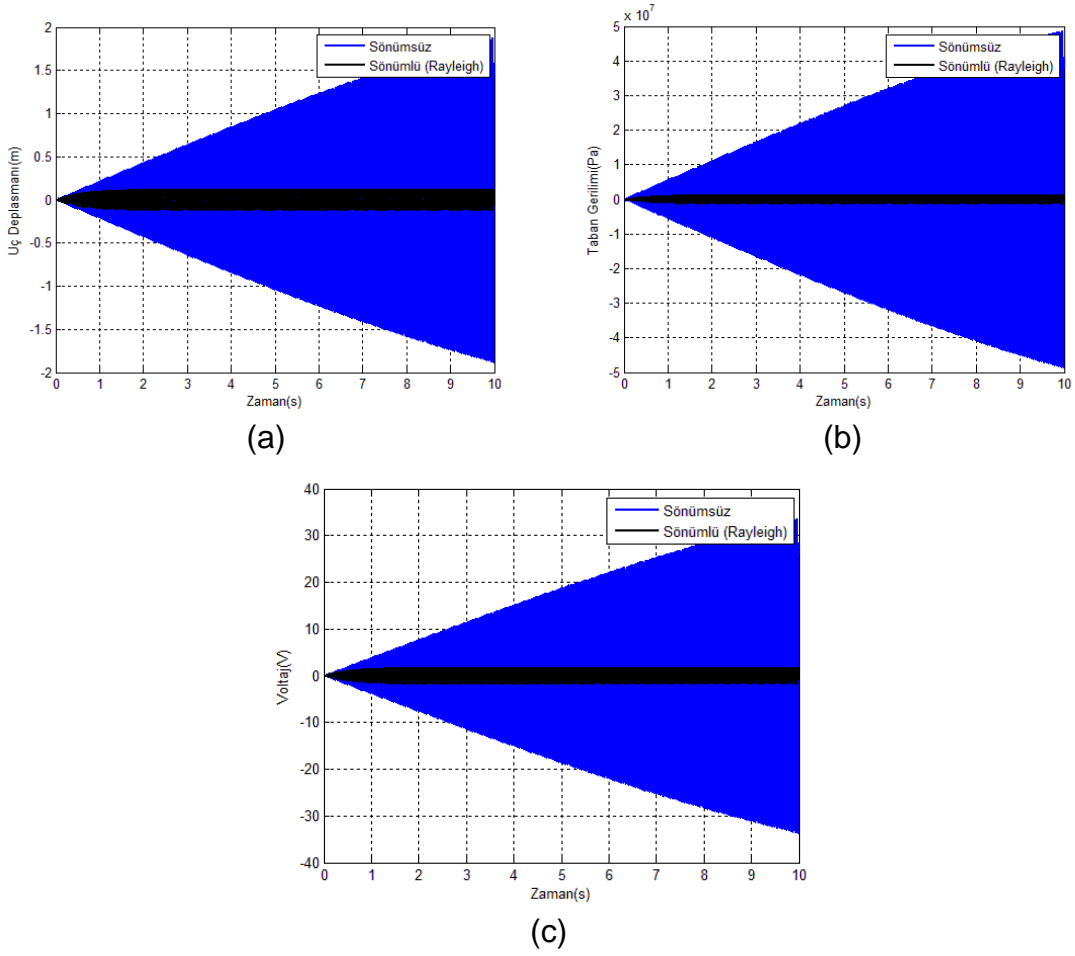
Dördüncü tip analizde, ucunda kütle olan yapının elastik sönümlü (Rayleigh) ve viskoelastik konfigürasyonları için karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Elastik yapının sönüm katsayısı, viskoelastik sönümlenme değerine eş değer bir değer simülasyonda iteratif bir şekilde hesaplanması ile belirlenmiştir. Şekil 3.18'de uç kütleli yapının elastik (sönümlü) ve viskoelastik özellikte tanımlanan malzeme özellikleri için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b) ve voltaj çıktısı (c) değerleri

zaman tabanında gösterilmiştir. Bu analizde, harmonik tahrik 10 s süre boyunca uygulanmıştır. Rayleigh sönümlenme katsayısı kullanılarak tanımlanan sönümlenme özellikli elastik malzemenin viskoelastik malzeme modeli ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.



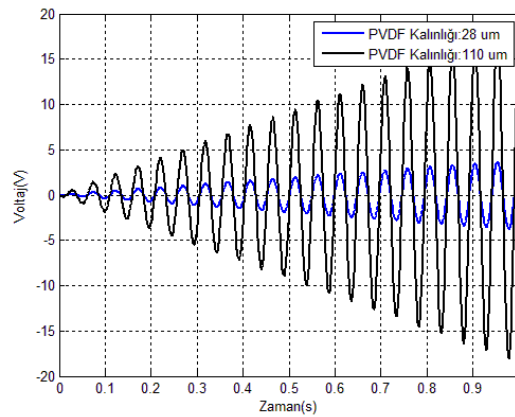
Şekil 3.18. Uç kütleli yapının farklı malzeme özellikleri için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

Beşinci tip analizde, ucunda kütle olan yapının sönümlü (Rayleigh) ve sönümsüz konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Uç deplasman, taban gerilimi ve voltaj çıktısı sonuçları Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Sönümsüz malzeme modeli kullanılarak elde edilen sonuçların sürekli artış eğiliminde olduğu görülmektedir.



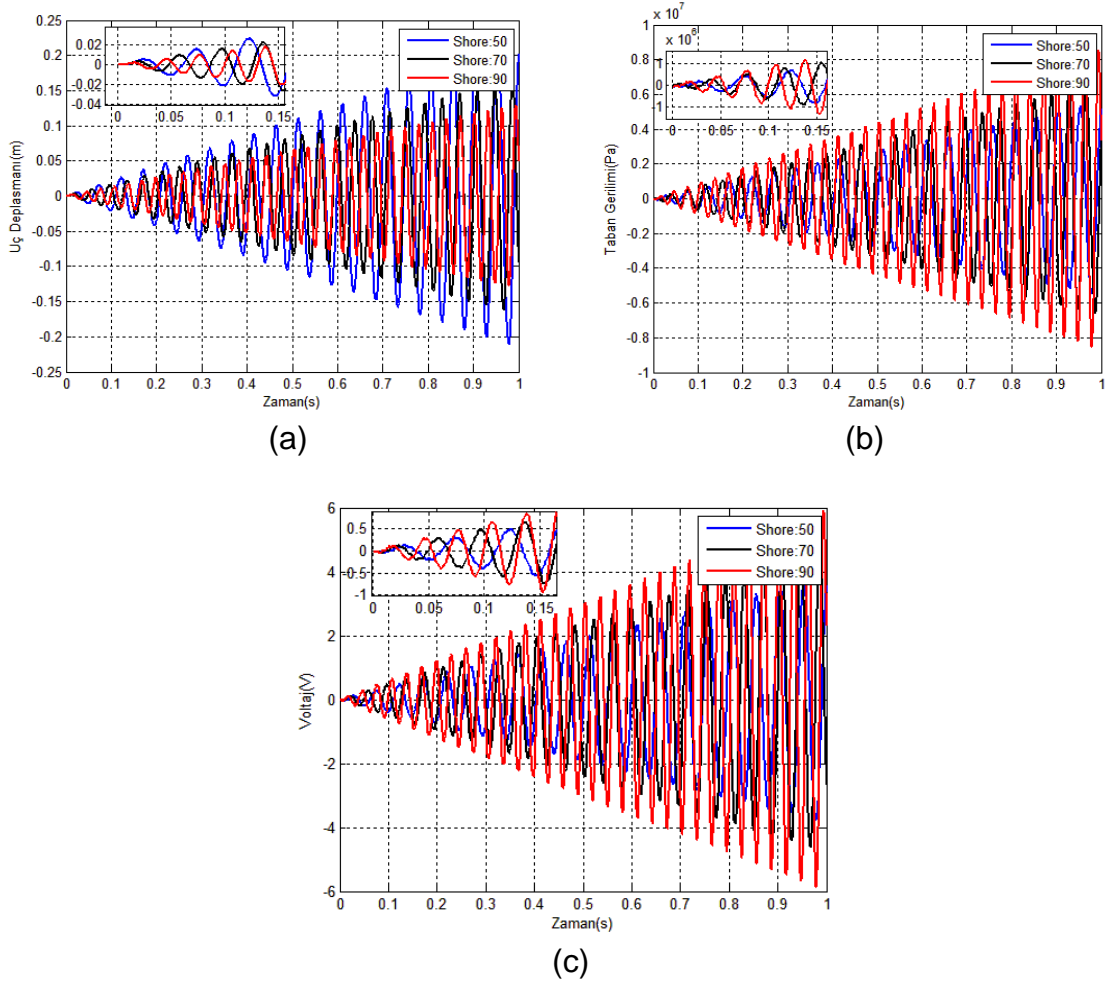
Şekil 3.19. Uç kütleli yapının farklı sönümlü ve sönümsüz malzeme modelleri için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

Altıncı tip analizde, farklı kalınlıklara sahip piezoelektrik malzemeler kullanılarak elde edilen voltaj çıktı değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.20). Sonuçlarda, piezoelektrik malzeme kalınlığının voltaj çıktı değeri ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Bu özellik denklem (3.24) ile de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Farklı kalınlığa sahip piezoelektrik malzemelerin voltaj çıktısı

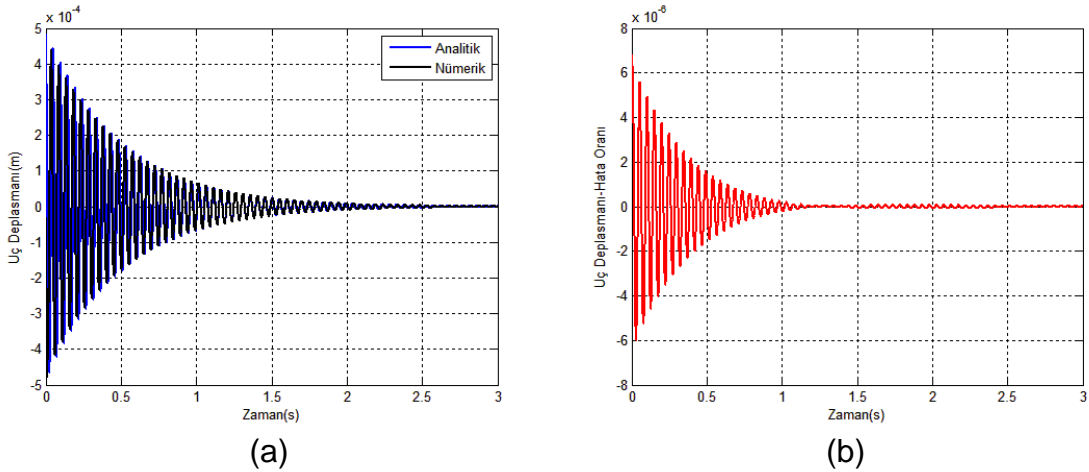
Yedinci tip analizde, farklı sertlik değerine sahip olan polimer sütünlerin karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. 50, 70 ve 90 Shore değerlerinde sertliğe sahip olan polimer sütünlerin uç deplasmanları (Şekil 3.21 (a)), taban gerilimleri (Şekil 3.21 (b)) ve voltaj çıktıları (Şekil 3.21 (c)) incelenmiştir. Şekil 3.21 (a)'da polimer sütünün sertlik artışının uç deplasmanın düşmesine sebep olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, Şekil 3.21 (b) ve (c)'de sertlik arttıkça tabanda daha fazla gerilme oluşması sebebiyle voltaj çıktısı değerinin arttığı gözlenmektedir. Fakat uç noktanın titreşimlerinden kaynaklı taban gerilmesinin düşmesinden dolayı voltaj çıktısında beklendiği kadar yüksek bir artış görülmemiştir. Bu yüzden polimer sütünlerin sertlik değerinin maksimum voltaj çıktısı elde edilecek şekilde optimize edilmesi gereklidir.



Şekil 3.21. Uç kütleli yapının farklı sertlik değerleri için zaman tabanında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

3.2.2.4. Adım Tahrik Altında Yapının Titreşim Analizi

Adım tahrik analizi, yapıya tabandan uygulanan darbe veya adım tahrik durumunda yapının dinamik cevabının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Voltaj serbestlik derecesine izin vermesi ve birim deplasman tahriki uygulanabilmesi sebebiyle geçiş analizleri için tam metot seçilmiştir. Sınır koşulları için piezoelektrik malzemenin alt yüzü sabitlenmiş ve üst yüzeyinde voltaj serbestlik derecesine sahip olan yarım elektrotlar tanımlanmıştır. Zaman aralığı (3.45) ve (3.46)'da gösterilen denklemler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (0.001 s). Yapıya tabandan 0.001 s süresince 3g değerinde deplasman uygulanmış ve yapının dinamik cevabı birçok farklı konfigürasyon için hesaplanmıştır. Yapının uç noktasının zamana bağlı olarak analitik (Denklemler 3.10) ve nümerik cevabı ile hata eğrisi Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Yüzde hata değeri % 1.4 olarak hesaplanmıştır.



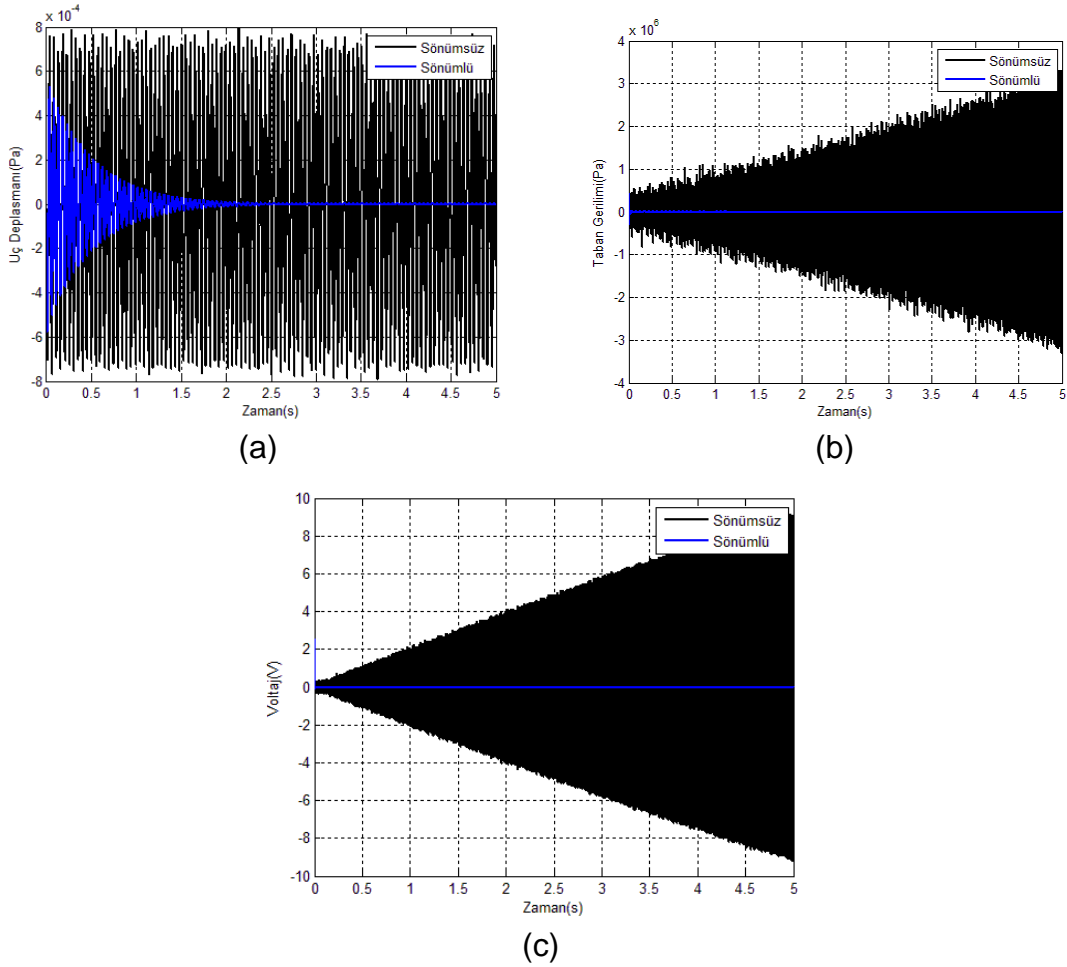
Şekil 3.22. Adım titreşim tahriki altında yapının uç noktasının analitik ve nümerik cevabı (a) ve hata eğrisi (b)

Adım tahrik analizi kapsamında enerji hasatçının dinamik cevabının incelenmesi amacıyla dört farklı koşul için simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar Çizelge 3.14'te sıralanmaktadır. Simülasyonlar sonucunda genel olarak uç noktanın deplasman eğrileri, tabanda oluşan gerilim eğrileri ve elektrotlardan elde edilen voltaj eğrileri çıkarılmıştır. Analiz sonuçları genel olarak harmonik analiz çıktıları ile benzer sonuçlar (farklı konfigürasyonların yapıya etkileri bakımından) göstermektedir.

Çizelge 3.14. Adım tahrik titreşimi altında gerçekleştirilen analiz çalışmaları

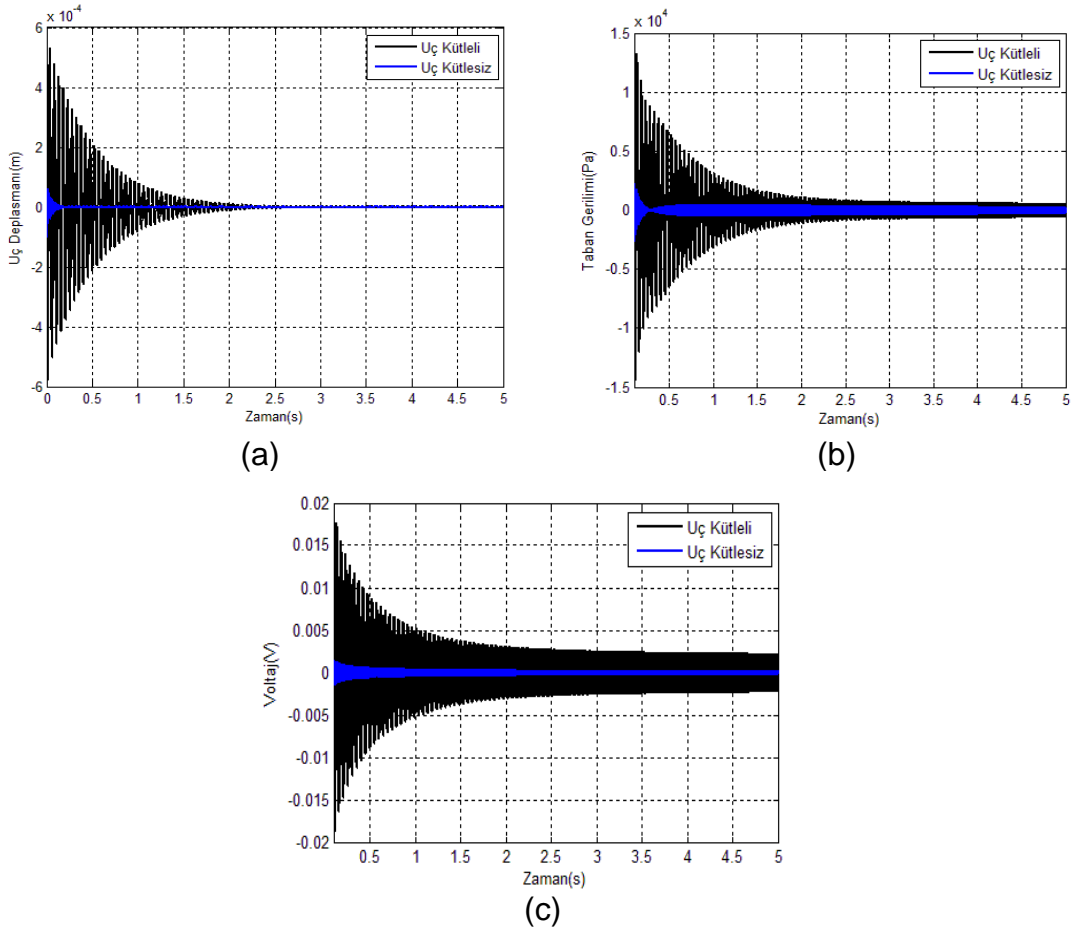
Koşul	Analiz Başlığı
1	Ucunda kütle olan yapının sönümlü (Rayleigh) ve sönümsüz konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi
2	Ucunda kütle olmayan ve olan yapıların karşılaştırmalı analizi
3	Farklı sertlik değerine sahip olan uç kütleli polimer sütunların karşılaştırmalı analizi
4	Farklı polimer alt katman kalınlıklarına sahip olan uç kütleli yapıların karşılaştırmalı analizi

İlk tip analizde ucunda kütle olan yapının sönümlü (Rayleigh) ve sönümsüz konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 3.23'te verilmektedir. Adım tahrik durumunda tabanda meydana gerilim ve elde edilen voltaj seviyesi büyük ölçüde düşmektedir.



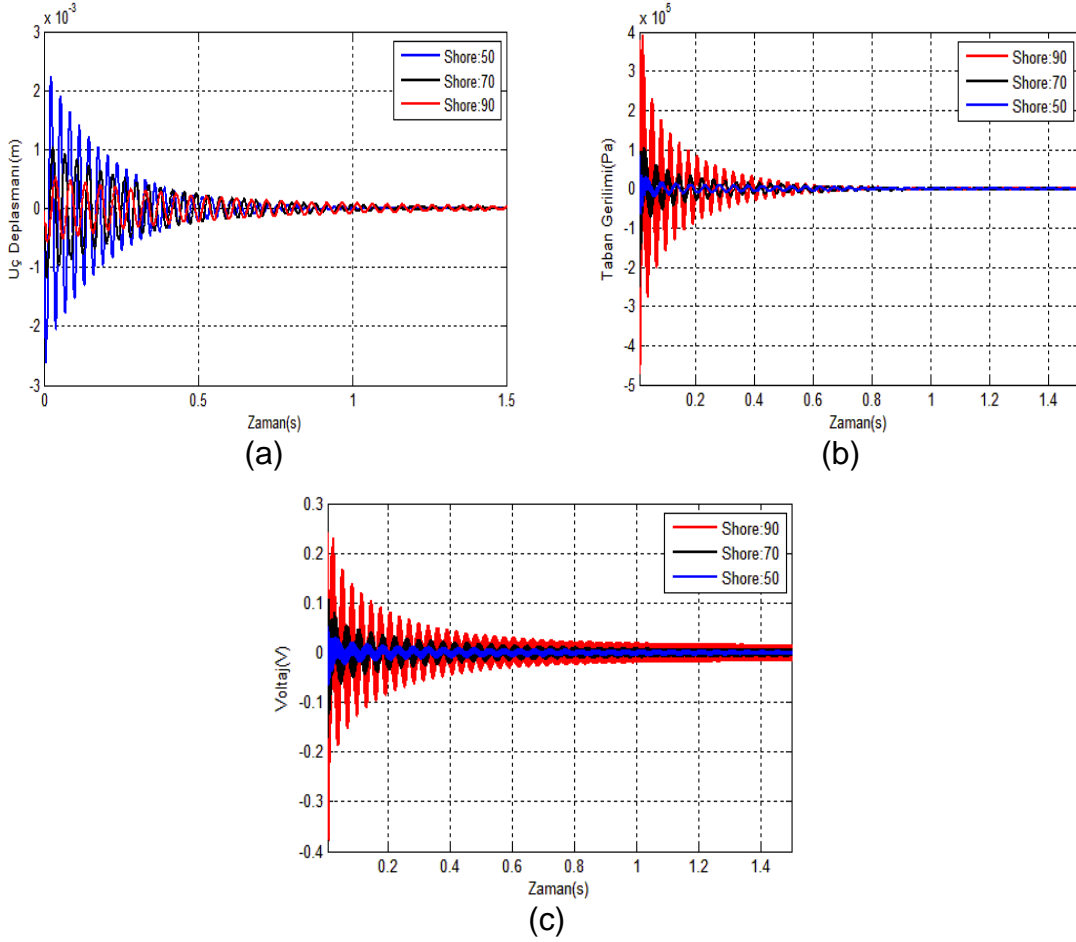
Şekil 3.23. Adım tahrik titreşim altında yapının sönümsüz ve sönümlü konfigürasyonları için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

İkinci tip analizde, ucunda kütle olmayan ve olan yapıların karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.24). Uç kütle, yapının daha uzun süre deplasman yapmasını sağlamıştır. Bu yüzden verilen aynı adım tahrik kuvvetine karşılık daha fazla taban gerilimi ve voltaj çıktısı elde edilmiştir. Bu durum, enerjinin malzeme üzerine yayılmadığını ve uç kütle üzerinde kaldığını göstermektedir. Bu kapsamda, enerjinin maksimum mümkün olacak şekilde toplanması için uç kütle kullanılması en yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir.



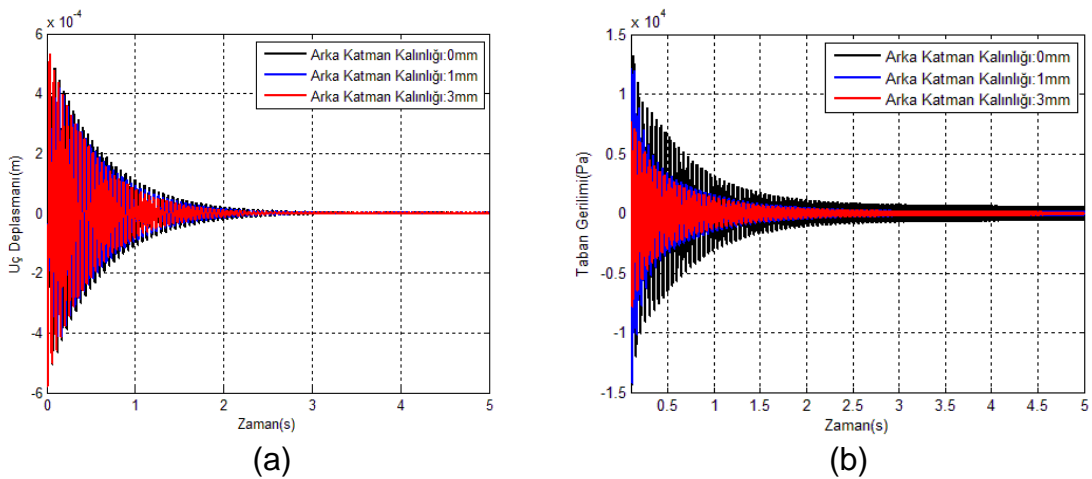
Şekil 3.24. Adım tahrik titreşim altında yapının uç kütleli ve kütlesiz konfigürasyonları için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

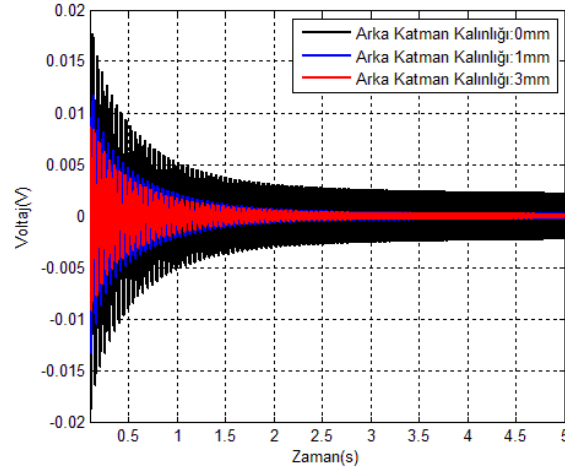
Üçüncü tip analizde, farklı sertlik değerine sahip olan uç kütleli polimer sütunların adım tahriki altında karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.25). Beklendiği üzere sertlik değerinin düşmesi uç deplasman genliğinin düşmesine sebep olurken, tabanda oluşan gerilim ve voltaj çıktısının artmasını sağlamıştır. Sonuç, harmonik analiz sonucu ile benzer özellik göstermektedir.



Şekil 3.25. Adım tahrik titreşim altında yapının farklı sertlik değerleri için uç deplasmanı (a3), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

Dördüncü tip analizde, farklı polimer alt katman kalınlıklarına sahip olan uç kütleli yapılar karşılaştırılmıştır (Şekil 3.26). Alt katman kalınlığı artışının uç deplasmana etkisi pek görünmese de, tabanda oluşan gerilimde ve voltaj çıktısı değerinde düşmeye sebep olmuştur. Bu sonuç da, harmonik analizde karşılaşılan sonuç ile benzer özellik göstermektedir.





(c)

Şekil 3.26. Adım tahrik titreşim altında yapının farklı arka katman kalınlıkları için uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

3.2.3. Çok Sütunlu Yapının Titreşim Analizi

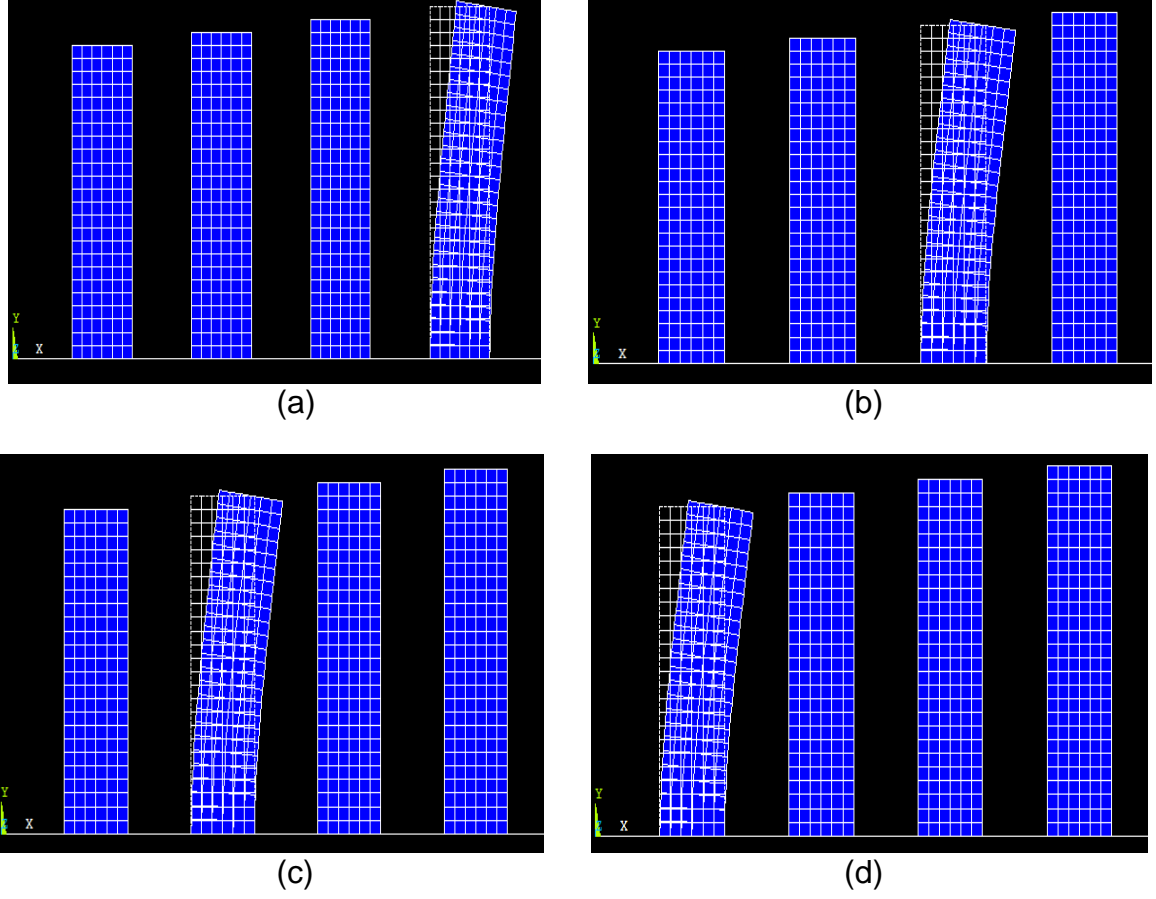
Çok sütunlu yapının titreşim analizinde ucunda kütle olmayan konfigürasyon için sıralı şekilde dört farklı uzunlukta sütun modellenmiştir. Modellemede kullanılan özellikler Bölüm 3.2.2.1’de detaylı olarak anlatılmıştır. Modellenen yapıların geometrik boyutları Çizelge 3.15’te gösterilmektedir.

Çizelge 3.15. Çok sütunlu polimer sütunların geometrik özellikleri

Parça	Çap (mm)	Uzunluk (mm)
Polimer Sütun - 1	3	12
Polimer Sütun - 2	3	12.5
Polimer Sütun - 3	3	13
Polimer Sütun - 4	3	13.5

3.2.3.1. Modal Analiz

Her bir polimer sütunun doğal frekanslarının belirlenmesi amacıyla modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analizde kullanılan teoriler ve özellikler Bölüm 3.2.2.2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Modal analiz sonucunda her bir polimer sütunun ilk 5 modu çıkarılmıştır. Yapıların ilk modları Şekil 3.27’de gösterilmektedir. Ayrıca Çizelge 3.16’da her bir sütun için ilk 5 modun doğal frekans değerleri ve mod şekilleri listelenmektedir.



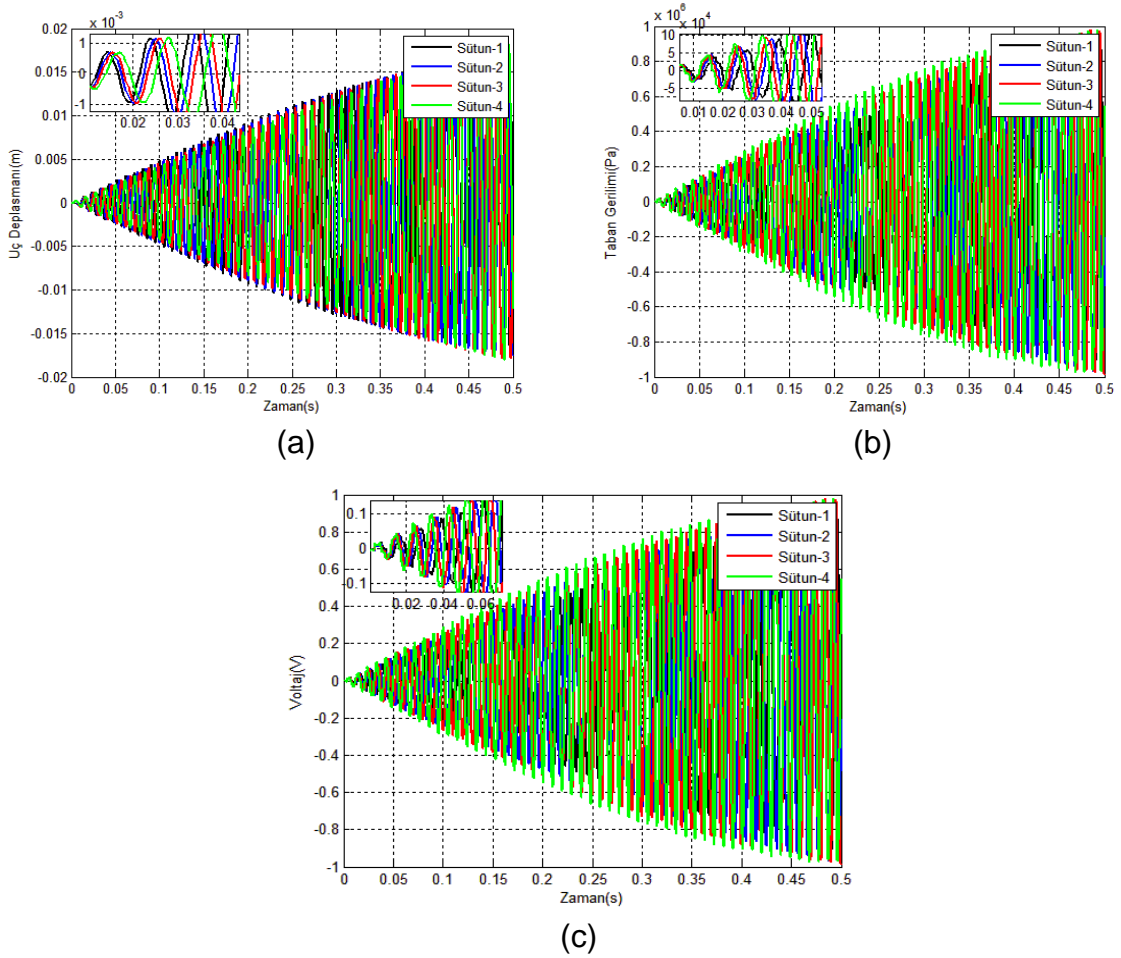
Şekil 3.27. Çok sütunlu yapının ilk doğal frekansları: polimer sütun-4 (a), taban polimer sütun-3 (b), polimer sütun-2 (c), polimer sütun-1 (d)

Çizelge 3.16. Çok sütunlu yapıdaki her bir sütunun ilk beş doğal frekansı

Mod Numarası	Polimer Sütun-1	Polimer Sütun-2	Polimer Sütun-3	Polimer Sütun-4	Mod Şekli
1	105.3	100.3	96.36	90.4	Yanal yönde titreşim-Mod-1
2	597.67	560.18	525.98	494.69	Yanal yönde titreşim-Mod-2
3	780.83	749.50	720.58	700.81	Dikey yönde titreşim-Mod-1
4	1310.20	1284.52	1214.10	1181.92	Yanal yönde titreşim-Mod-3
5	2020.41	1980.88	1960.52	1875.65	Yanal yönde titreşim-Mod-4

3.2.3.2. Harmonik ve Adım Tahrik Analizleri

Harmonik tahrik analizi kapsamında yapıya sırasıyla her bir sütunun rezonans frekansında 1 g değerinde tahrik kuvveti uygulanmış ve sönümsüz model için uç deplasmanı, tabandaki gerilim ve voltaj çıkış değerleri incelenmiştir (Şekil 3.28). Sonuçlarda, her bir yapının doğal frekans değerinin farklı olmasından dolayı sütunların titreşimleri arasında faz farkı olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, yapıların uç deplasmanları ve voltaj değerleri arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir.

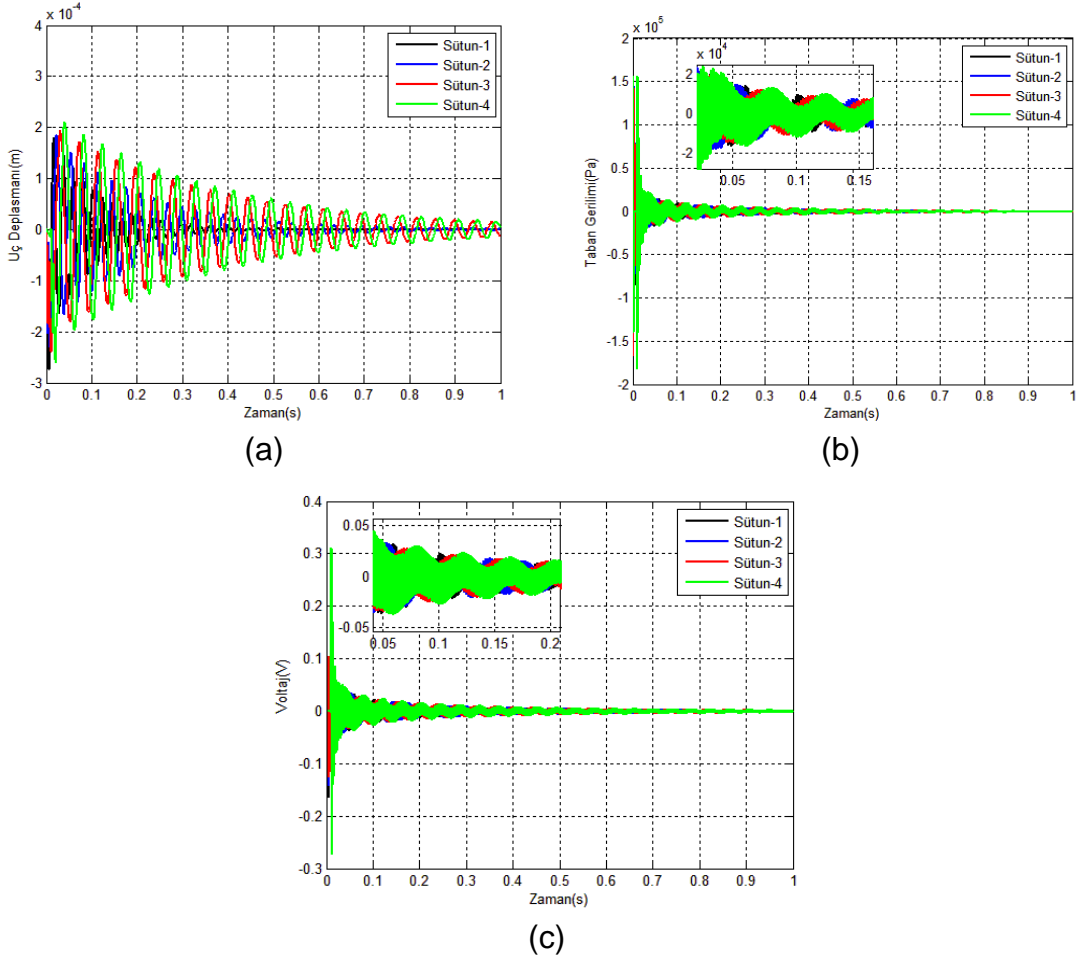


Şekil 3.28. Çok sütunlu yapının sönümsüz modeli için harmonik rezonans

frekansında titreşim altında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı(c)

Adım tahrik analizi kapsamında çok sütunlu yapının sönümlü modeli için 1 g değerinde taban deplasmanı uygulanmış ve 1 s süresince yapının uç deplasmanı, tabandaki gerilim ve voltaj çıkış değerleri incelenmiştir (Şekil 3.29). Sonuçlarda, doğal frekans değeri en düşük olan sütunun daha uzun süre titreşimini sürdürdüğü ve en yüksek olan sütunun titreşimlerinin ise, 1 s içerisinde sönümlendiği tespit

edilmektedir. Bu durum, sütunların uç noktadaki titreşimlerinin artmasının taban gerilimi ve voltaj çıkış değerlerinde artışa yol açtığını göstermektedir. Yani, polimer sütun üzerinde ne kadar fazla elastik enerji depolanabilirse, o kadar daha fazla voltaj üretilmektedir. Bu yüzden, tasarım aşamasında uç kütleli polimer sütunlar kullanılarak yapıların atalet değerlerinin artırılması gerekmektedir.



Şekil 3.29. Çok sütunlu yapının sönümlü modeli için adım tahrik titreşimi altında uç deplasmanı (a), taban gerilimi (b), voltaj çıktısı (c)

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında tek ve çok sütunlu yapılarda tasarlanan enerji hasadı sistemleri üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde enerji hasatçıların üretim prosesleri, performans testleri için kurulan deney düzeneği, gerçekleştirilen deneyler ve sonuçları anlatılmaktadır. Ayrıca tek ve çok sütunlu yapılar için yapılan nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmaktadır.

4.1. Enerji Hasadı Sistemi Üretimi

Enerji hasatçı Şekil 3.1'de gösterildiği üzere temelde polimer sütunlar ve piezoelektrik alt katmandan meydana gelmektedir. Bu kapsamda enerji hasatçı üretimi iki ana yapının (polimer sütun ve piezoelektrik alt katman) ayrı üretilmesi ve sonrasında birleştirilmesi işlemlerini içermektedir. Bu kısımda öncelikle polimer sütunların üretim prosesi açıklanacaktır. Sonrasında piezoelektrik alt katman kullanımına ve polimer sütun ile birleştirme metoduna değinilecektir.

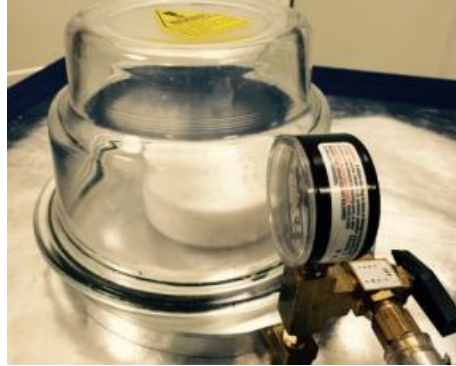
Tek ve çok sütunlu yapılarda tasarlanan polimer sütunların üretilmesi için birincil işlem, tasarım aşamasında belirlenen geometrik boyutlara uygun olarak kalıpların hazırlanmasıdır.

Tek sütunlu polimer yapının üretimi için silikon kauçuk malzemeden kalıp hazırlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle tek sütunlu yapı çelik malzemeden talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş ve bir kaba yerleştirilmiştir. Bununla birlikte silikon kauçuk ve sertleştiricisi 10:1 oranında karıştırılarak aynı kaba dökülmüştür. Oda sıcaklığında yaklaşık 24 saat beklenmiştir. Silikon kauçuk malzemenin kurduğu gözlemlenerek kaptan dışarı alınmış ve enerji hasatçının üretimi için kalıp hazırlanmıştır (Şekil 4.1). Sonrasında polidimetilsiloksan (PDMS) veya poliüretan ve sertleştiricileri ile 10:1 (PDMS) ya da 1:1 (poliüretan) oranında karıştırılarak silikon kauçuk kalıba dökülmüştür. Vakum cihazı kullanılarak malzemenin içindeki hava kabarcıkları alınmıştır (Şekil 4.2 (a)). Vakum işlemi sonrasında kalıp yüksek sıcaklık fırınında 100°C sıcaklıkta, yaklaşık 30 dakika bekletilerek sertleşmesi sağlanmıştır (Şekil 4.2(b)). Fırından alındıktan sonra polimer malzemenin kurduğu gözlemlenerek bir cımbız yardımıyla kalıptan çıkarılmıştır. Kalıbın esnek silikon kauçuk malzemeye sahip olması polimer tek sütunlu yapının kurduktan sonra rahatça kalıptan çıkarılmasını sağlamaktadır.

Enerji hasadı sisteminin alt yüzeyinde ise, farklı katman kalınlıklarına sahip (25 veya 110 μm), ticari olarak mevcut olan PVDF ince filmler kullanılmıştır. PVDF filmin üst yüzeyi tek sütunlu yapının çapına uygun olarak dört çeyrek elektrot ile kaplanmıştır. Polimer tek sütunlu yapı çift taraflı bant veya basınca duyarlı yapıştırıcı kullanılarak PVDF film ile birleştirilmiştir. Nihai konfigürasyonda üretilen tek sütunlu yapı, dört çeyrek elektrotlu PVDF film ve iki ana yapının birleştirilmesi sonucu meydana gelen enerji hasadı sisteminin fotoğrafı Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Ayrıca sistemin uç noktasına konulacak kütle için, performansa etkisinin araştırılması amacıyla çelik malzemeden uç kütle üretilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.1. Tek sütunlu polimer yapı üretimi için silikon kauçuk malzemeden kalıp



(a)

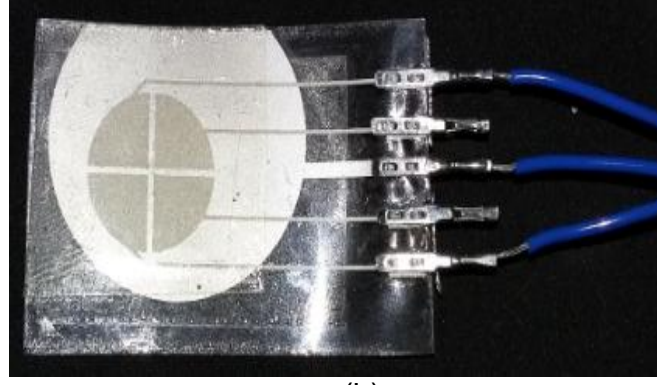


(b)

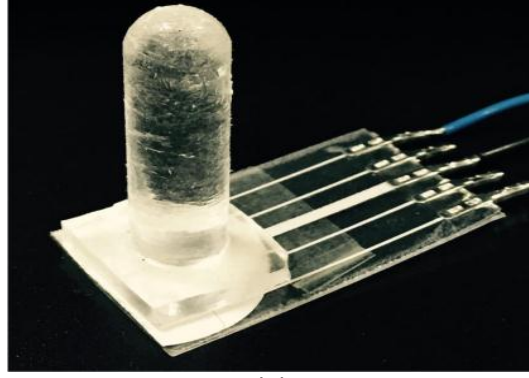
Şekil 4.2 Solüsyonun vakum cihazı içerisindeki görüntüsü (a) ve fırın (b)



(a)

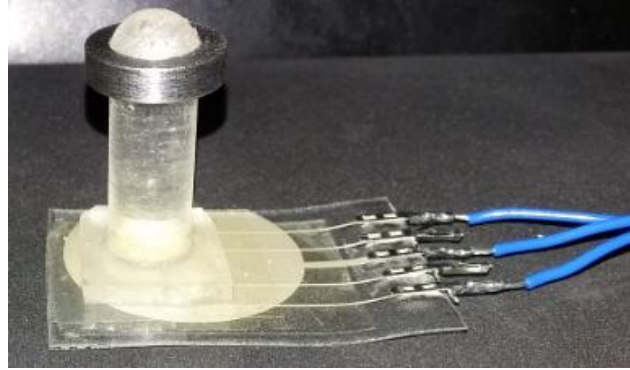


(b)



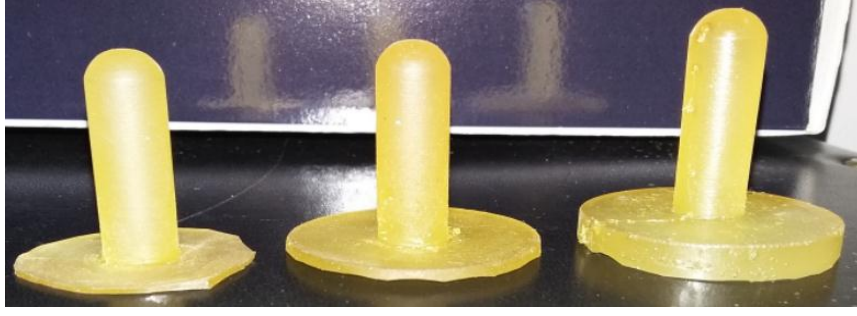
(c)

Şekil 4.3. Tek sütunlu polimer (PDMS) yapı (a), dört çeyrek elektrot ile kaplı PVDF film (b), tek sütunlu enerji hasatçı (c)



Şekil 4.4. Tek sütunlu uç kütleli enerji hasatçı

Bunun yanı sıra polimer sütunun arka katman kalınlığının enerji hasatçıdan elde edilen voltaj çıktısına etkisinin incelenmesi amacıyla farklı arka katman kalınlıklarında tek sütunlu polimer (poliüretan) yapılar üretilmiştir (Şekil 4.5). Yapıların üretim prosesi yukarıda açıklanmıştır. Yapılar PVDF film ile birleştirilerek teste hazır hale getirilmiştir.

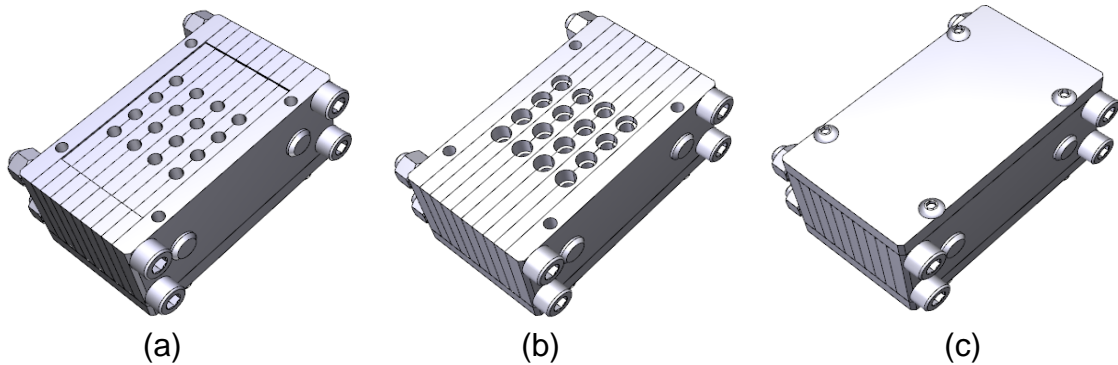


Şekil 4.5. Farklı arka katman kalınlıklarına sahip polimer yapılar

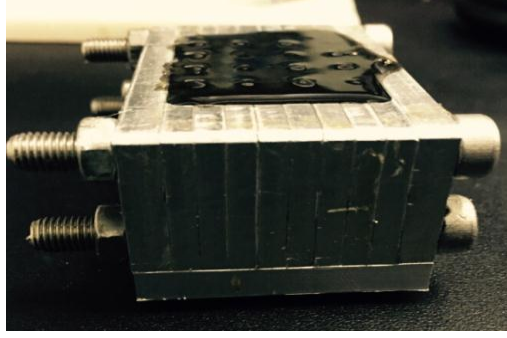
Çok sütunlu polimer yapıların kalıpları uç kütsüz ve uç kütleli konfigürasyonlar için ayrı hazırlanmıştır.

Çok sütunlu ve uç kütsüz konfigürasyon için kalıplar, teflon malzemeye tasarım aşamasında belirlenen geometrik boyutlarda delik açma işlemi uygulanarak hazırlanmıştır. Polimer çözeltinin (PDMS ve sertleştirici karışımı) teflon kalıba dökülmesi, vakum ve fırınlama işlemleri sonrasında polimer sütunlar üretilmektedir. Teflon malzemenin kaygan bir yapıya sahip olması küçük boyutlara sahip polimer sütunların (1 – 5 mm çaplı) kalıptan cımbız yardımıyla kolayca çıkarılmasını sağlamaktadır.

Çok sütunlu ve uç kütleli konfigürasyon için ise, alüminyum malzemedan özel bir kalıp tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 4.6 (a)'da görülen üst yüzeye polimer çözeltisi dökülmektedir. Alt yüzeye (Şekil 4.6 (b)) farklı boyutlarda açılmış faturalı delikler sayesinde uç kütlelerin döküm sonrası kendiliğinden oluşması sağlanmaktadır. Döküm işlemi öncesi alt yüzey bir kapak ile kapatılmaktadır (Şekil 4.6 (c)). Kalıbın üretilmiş hali Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Döküm, vakum ve fırınlama işlemleri sonrasında kalıp demontajı yapılarak kalıp parçaları sırasıyla sökülmemektedir ve çok sütunlu yapı üretilmektedir.

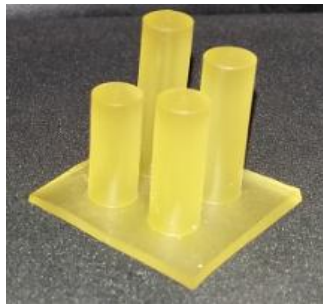


Şekil 4.6. Çok sütunlu (uç kütleli) polimer sütun üretimi için alüminyum kalıp tasarımı üst yüzeyi (a), alt yüzeyi (kapaksız) (b), alt yüzeyi (kapaklı) (c)

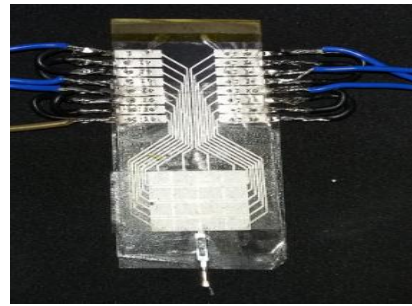


Şekil 4.7. Çok sütunlu (uç kütleli) polimer sütun üretimi için alüminyum kalıp
Bunların yanı sıra enerji hasadı sistemlerinden voltaj çıkışının sağlanması amacıyla farklı katman kalınlıklarına sahip PVDF filmlerin üst yüzeyleri çok sütunlu yapıların geometrik boyutları ve aralarındaki uzaklıklar göz önünde bulundurularak elektrotlar ile kaplanmıştır. Her bir sütun için dört çeyrek veya iki yarım elektrot konfigürasyonu uygulanmıştır. Sonrasında çok sütunlu yapılar çift taraflı bant veya basınca duyarlı yapıştırıcı kullanılarak PVDF film ile birleştirilmiştir.

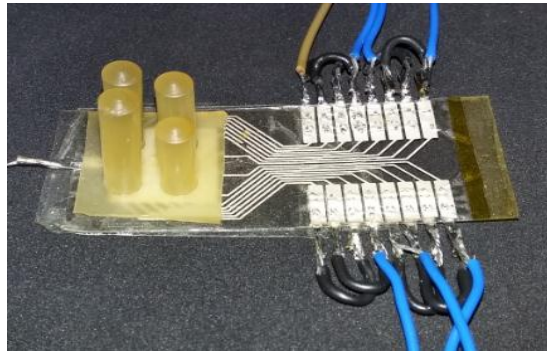
Geniş bantta enerji hasadının araştırılması amacıyla aynı çapta ve farklı uzunluklarda üretilmiş dörtlü polimer yapı (poliüretan), voltaj çıkışının sağlanması için kullanılan PVDF film (her bir sütun için dört çeyrek elektrotlu tasarıma sahip) ve enerji hasadı sisteminin nihai hali Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



(a)



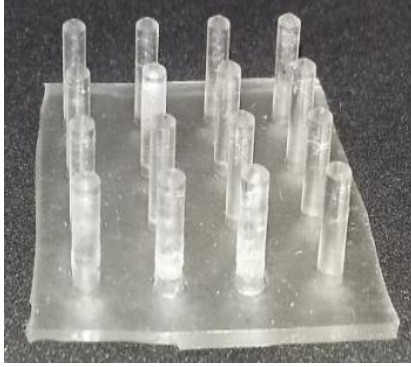
(b)



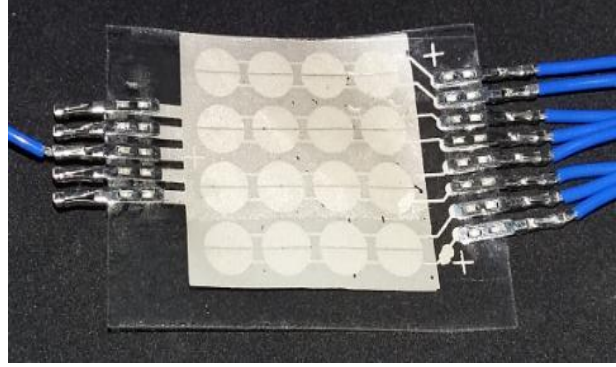
(c)

Şekil 4.8. Çok sütunlu (dörtlü) uç kütleli polimer yapı (a), PVDF film (b), enerji hasadı sistemi (c)

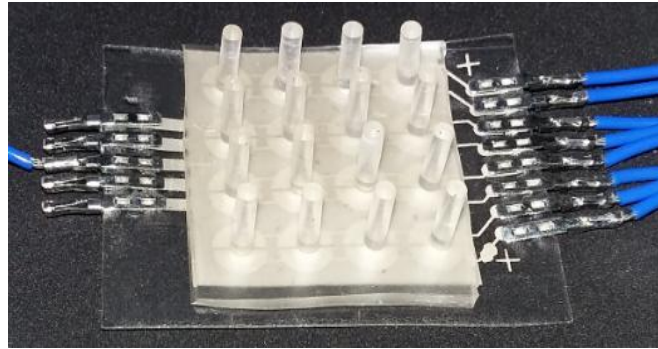
Sıra halinde çok sütunlu yapıların enerji hasadına etkisinin araştırılması amacıyla 4 x 4 sıralı şekilde on altılı polimer yapı (PDMS) üretilmiştir (Şekil 4.9 (a)). Voltaj çıkışının sağlanması amacıyla kullanılan yarım elektrotlu tasarıma sahip PVDF film Şekil 4.9 (b)'de gösterilmektedir. Bu tasarımda her bir tarafta bulunan elektrotlar birbirine bağlanmış ve her bir mod için (basma ve çekme) dörder adet voltaj çıkışı alınması sağlanmıştır. Enerji hasadı sisteminin nihai hali Şekil 4.9 (c)'de gösterilmektedir.



(a)



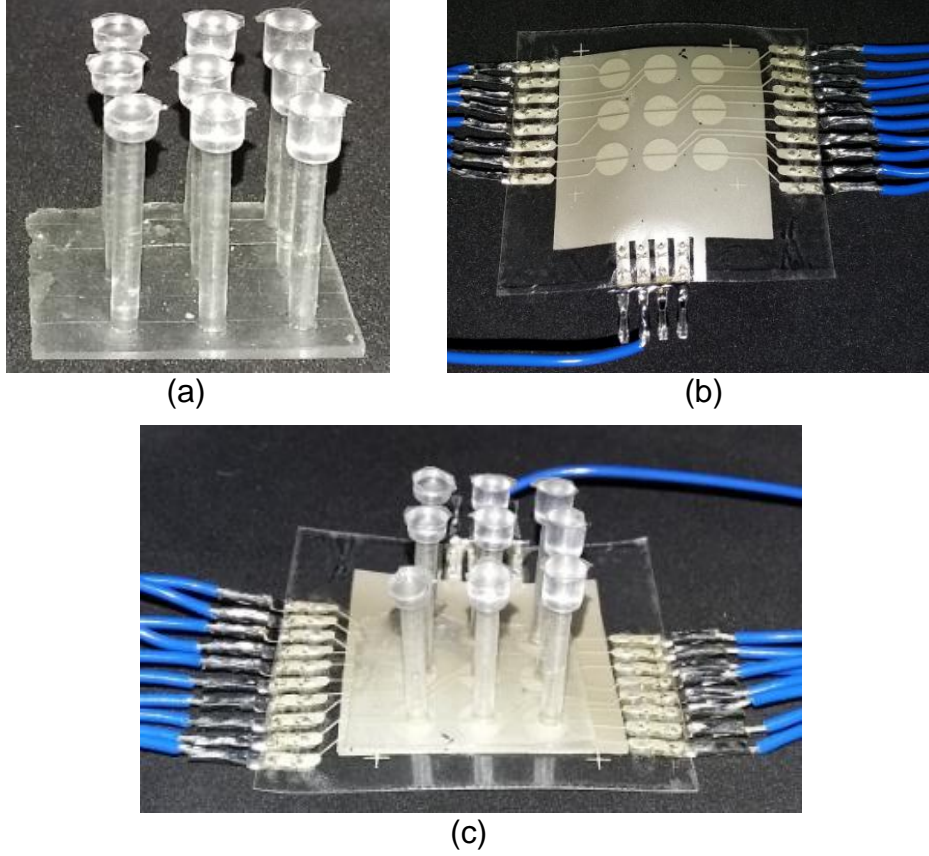
(b)



(c)

Şekil 4.9. Çok sütunlu (on altılı) uç kütleli polimer yapı (a), PVDF film (b), enerji hasadı sistemi (c)

Uç kütleli çok sütunlu yapılar ise, 3 x 3 sıralı şekilde PDMS malzemeden üretilmiştir. Her bir sıradaki uç kütleleri birbirinden farklı olacak şekilde üretim gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10 (a)). Bununla birlikte, voltaj çıkışının sağlanması amacıyla yarım elektrotlu tasarıma sahip PVDF film kullanılmıştır. Bu tasarımda PVDF film üzerinde bulunan her bir elektrottan ayrı voltaj çıkışı alınmaktadır (Şekil 4.10 (b)). Enerji hasadı sisteminin nihai hali Şekil 4.10 (c)'de gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Çok sütunlu (dokuzlu) uç kütleli polimer yapı (a), PVDF film (b), enerji hasadı sistemi (c)

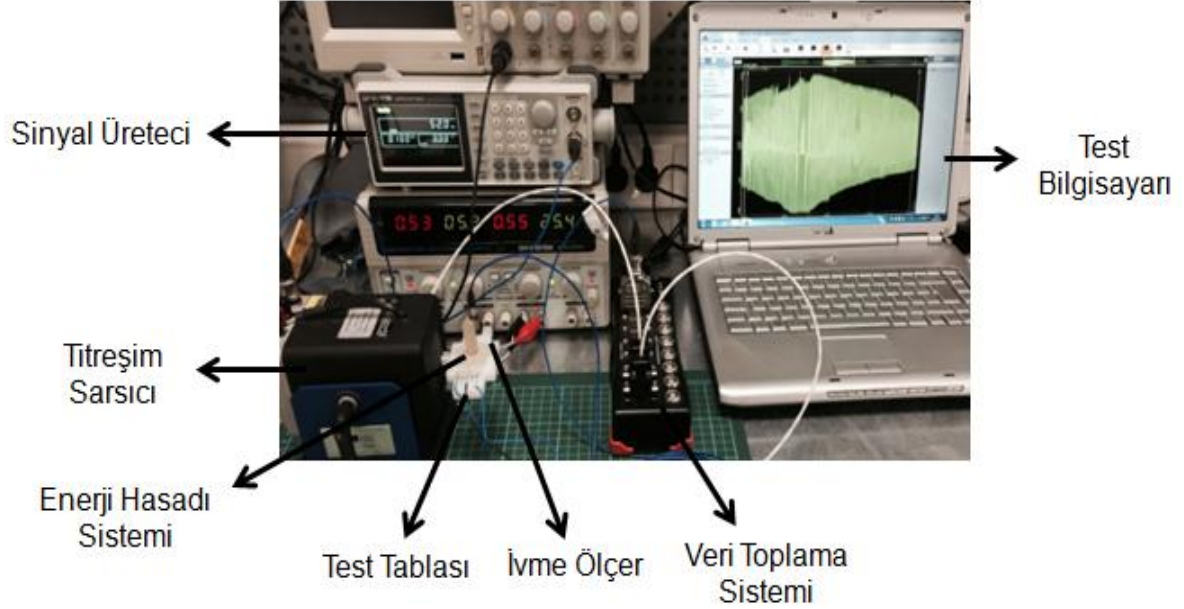
4.2. Deney Düzeneği

Bu kısımda, tek ve çok sütunlu enerji hasadı sistemlerinin performanslarının belirlenmesi amacıyla kurulan deney düzeneği açıklanmaktadır. Deney düzeneği, titreşim sarsıcı (TMS Modal Shop, K2004E01), sinyal üretici (Tektronix AFG 3021B), ivmeölçer (Brüel & Kjaer 4507B004), veri toplama sistemi (Dewe-43A / Dewesoft) ve test bilgisayarından oluşmaktadır.

Sinyal üretici kullanılarak belirli frekans ve genlikte üretilen voltaj sinyali titreşim sarsıcıya gönderilmektedir. Titreşim sarsıcı bağlantı ara yüzünde konumlandırılan test tablası üzerinde enerji hasadı sistemi ve ivmeölçer yerleştirilmiştir. Titreşim sarsıcı tarafından test tablasına uygulanan ivme değeri ivmeölçer kullanılarak ölçülmektedir. Enerji hasadı sisteminde yer alan piezoelektrik malzemenin çıkışları ve ivmeölçer çıkışı veri toplama sisteminin analog giriş ve çıkışlarına bağlanmaktadır. Hasatçının ürettiği voltaj sinyali veri toplama sistemi bilgisayar ara yüzü (Dewesoft yazılımı) kullanılarak anlık olarak kaydedilmektedir. Veri toplama sistemi örnekleme frekansı titreşim sarsıcı tarafından uygulanan tahrik frekansının

en az 20 katına denk gelecek şekilde ayarlanmaktadır. Verilerin analizi Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Titreşim Sarsıcı (a), Sinyal Üretici (b), İvmeölçer (c), Veri Toplama Sistemi (d), Deney Düzeneği (e)

4.3. Enerji Hasadı Sistemi Deneylei

Şekil 4.11'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak birçok farklı konfigürasyonda üretilen enerji hasatçı için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı enerji hasadı sistemi konfigürasyonları, polimer sütunların malzeme tipleri, PVDF film katman kalınlıkları ve sistemlerin çalışma modları Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Enerji hasadı sistemi konfigürasyonları

No	Enerji Hasadı Sistemi Tanımı	Sütun Tipi	PVDF film katman kalınlığı (µm)	Çalışma Modu
1	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	PDMS	28	d33 + d31
2	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	PDMS	28	d33
3	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	PDMS	110	d33
4	Tekli Sütun (uç kütleli)	PDMS	110	d33
5	Tekli Sütun (farklı polimer alt katman kalınlıklarında)	Poliüretan	110	d33
6	Dörtlü Sütun (farklı uzunluklarda)	Poliüretan	28	d33
7	4 x 4 Sıralı Sütun (aynı boyutlarda)	PDMS	110	d33
8	3 x 3 Sıralı Sütun (uç kütleli, düz yüzey üzerinde)	PDMS	110	d33
9	3 x 3 Sıralı Sütun (uç kütleli, eğimli yüzey üzerinde)	PDMS	110	d33

Bu kısımda, Çizelge 4.1'te gösterilen her bir enerji hasadı sistemi için gerçekleştirilen frekans taraması, harmonik yanal yönde taban tahriki ve harmonik tahrik altında voltaj ve güç ölçüm testleri ile sonuçları anlatılmaktadır.

4.3.1. Tek Sütunlu Enerji Hasadı Sistemi Deneyleri

Bu bölümde, Çizelge 4.1'de gösterilen 1-5 arası konfigürasyonlara sahip enerji hasatçılar için gerçekleştirilen deneyler ve sonuçları anlatılmaktadır.

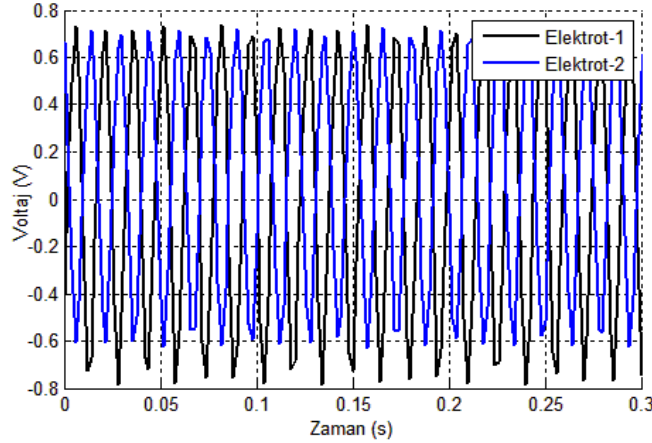
İlk konfigürasyonda d33 ve d31 modunda çalışan uç kütsesiz tek sütunlu polimer yapının testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3). Yapının boyutları Çizelge 4.2'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.2. Tek sütunlu yapı boyutları

No	Enerji Hasadı Sistemi Tanımı	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Uzunluk Oranı	Aktif Alan (mm ²)
1	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	10	30	3	39

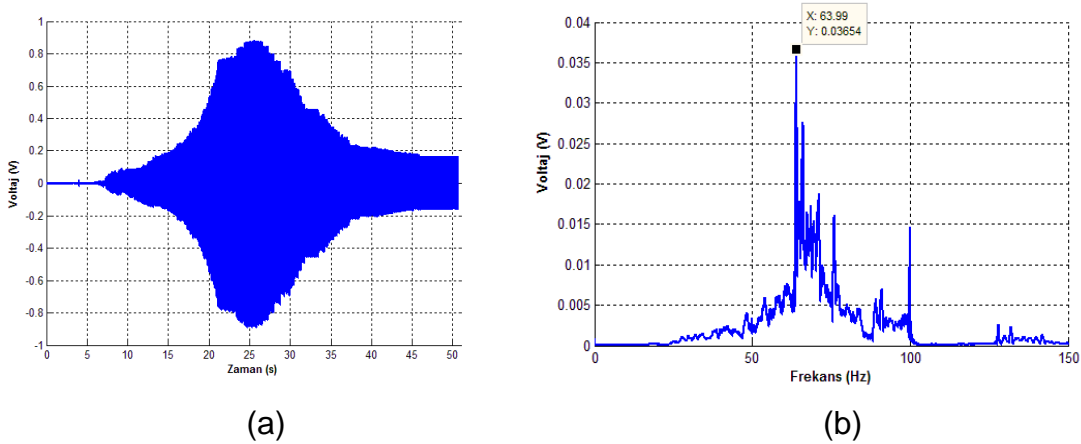
Testlerde öncelikle tabandan yanal yönde uygulanan harmonik tahrik titreşimi altında her bir yarım elektrottan alınan voltaj sinyalleri karşılaştırılmıştır. Yanal

yönde titreşimler sırasında polimer sütunun nötr eksenine göre bir tarafta basma ve diğer tarafta çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu yüzden, beklendiği üzere her yarım elektrottan alınan voltaj sinyali arasında 180° lik faz farkı ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.12). Her iki elektrotun aynı hatta bağlanması voltaj sinyali çıkışının sıfırlanmasına sebep olmaktadır. Bu durum, yarım elektrot çıkışlarından ayrı hatlardan voltaj sinyali alınması gerektiğini göstermektedir.



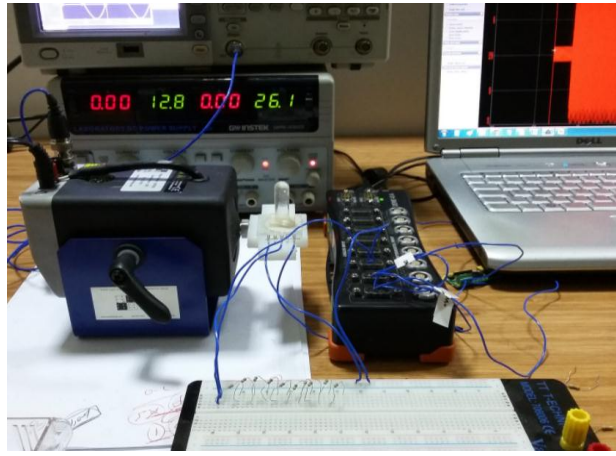
Şekil 4.12. Harmonik titreşim altında iki yarım elektrottan alınan voltaj çıkış sinyalleri

Sadece tek bir hattan voltaj sinyali alınarak sistemin frekans taraması testi gerçekleştirilmiştir. Bu testte 3 g ivme genliğinde ve 0 ile 150 Hz arasında tahrik titreşimi uygulanmıştır. Yapının zaman ve frekans tabanında cevapları Şekil 4.13 (a) ve (b)'de sırasıyla gösterilmektedir. Hasatçının ilk doğal frekansı 64 Hz olarak hesaplanmıştır.

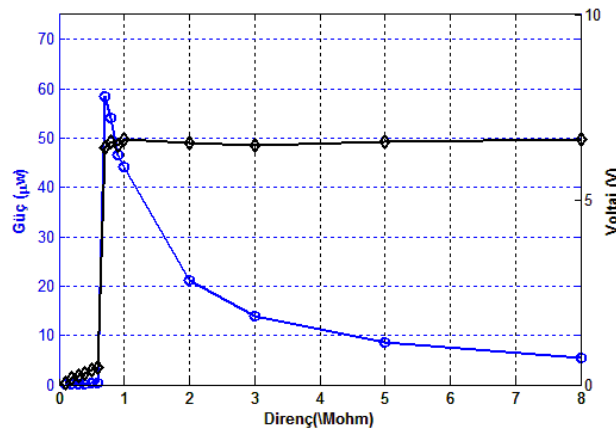


Şekil 4.13. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında

Enerji hasadı sisteminden elde edilecek güç çıkış değerinin ölçülmesi amacıyla Şekil 4.14'te gösterilen test düzeneği kurulmuştur. Bu kapsamda piezoelektrik malzemenin çıkışına farklı değerlerde dirençler bağlanarak devreden geçen voltaj değeri ölçülmüş ve buna karşılık gelen güç çıkış değerleri hesaplanmıştır. 3 g değerinde genlikte ve yapının rezonans frekansında tahrik edilen sistemden ölçülen voltaj ve güç değerleri Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Sistemden elde edilen maksimum voltaj çıkış değeri 6.52 V (tepeden tepeye) ve maksimum güç çıkış değeri 58.4 μ W olarak ölçülmüştür (Şekil 4.15). Maksimum güç çıkış değerine karşılık gelen empedans değeri 700 kOhm olarak belirlenmiştir.



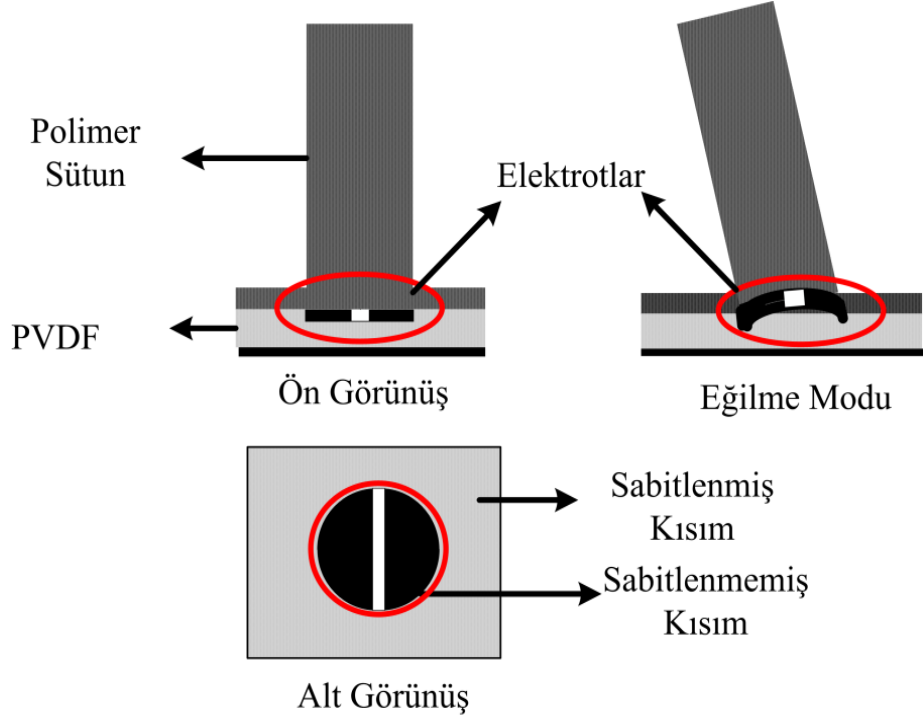
Şekil 4.14. Güç çıkış değeri ölçümü için kurulan deney düzeneği



Şekil 4.15. Tek sütunlu yapı (d33 ve d31 mod) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçümü

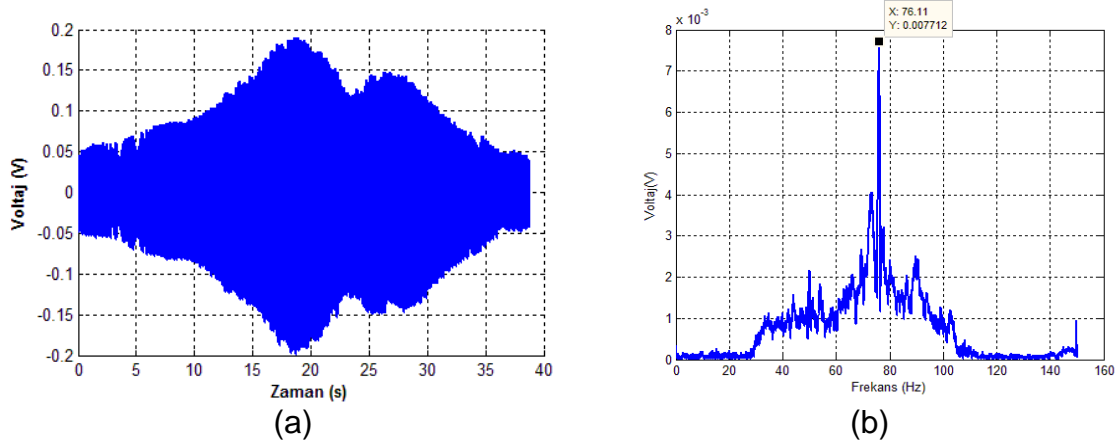
Enerji hasadı sisteminden elde edilen güç ve voltaj değerlerinin yüksek olması yapının hem d31, hem de d33 modunda çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu konfigürasyonda Şekil 4.16'da gösterildiği üzere piezoelektrik filmin alt ara yüzünün polimer sütunun ara yüzüne denk gelen kısmı tabana sabitlenmemiştir.

Diğer kısımlar ise, tabana sabitlenmiştir. Bu durum, yanal yönde titreşim altında piezoelektrik elemanın elektrotlarının üzerinde hem baskı, hem eğilme gerilmelerinin doğmasına yol açmaktadır. Bu yüzden d33 ve d31 modlarının katkısı ile yüksek voltaj ve güç çıkışı elde edilmektedir. Fakat, bu konfigürasyon sistemin tabana düzgünce sabitlenememesinden dolayı aynı şartlar altında farklı voltaj ve güç değerlerinin ölçülmesine sebep olmuştur. Sistemin kararlı bir yapı göstermemesi sebebiyle bu konfigürasyon ile çalışmalara devam edilmemiştir.



Şekil 4.16. Tek sütunlu yapı d33 ve d31 modlarında çalışma prensibi

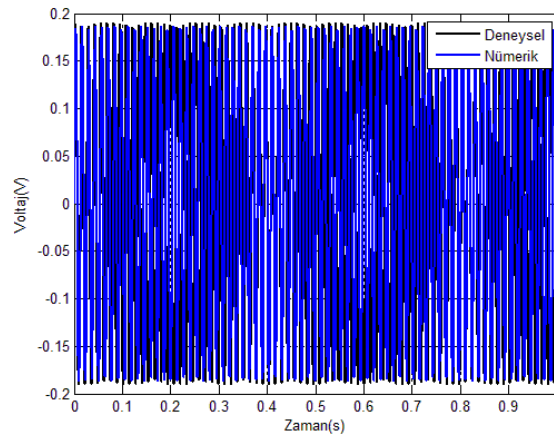
İkinci konfigürasyonda, aynı enerji hasadı sistemi kullanılmış ve sistemin alt ara yüzünün tamamı tabana sabitlenmiştir. Bu sayede, sadece d33 modunun yapının voltaj ve güç çıkış değerlerine etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.17'de yapıya uygulanan frekans taraması testi sonuçları zaman ve frekans tabanında gösterilmiştir. Yapının ilk doğal frekansı 76.11 Hz olarak hesaplanmıştır. Bu değer analitik ve nümerik hesaplanan doğal frekans değerleri ile uygunluk göstermektedir (Çizelge 4.3). Bunun yanı sıra, yapıya rezonans frekansında 1 s süresince 3 g ivme değerinde harmonik titreşim uygulanmış ve ölçüm verisi nümerik sonuç ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.18). Ortalama nümerik hata % 2.2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.17. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında

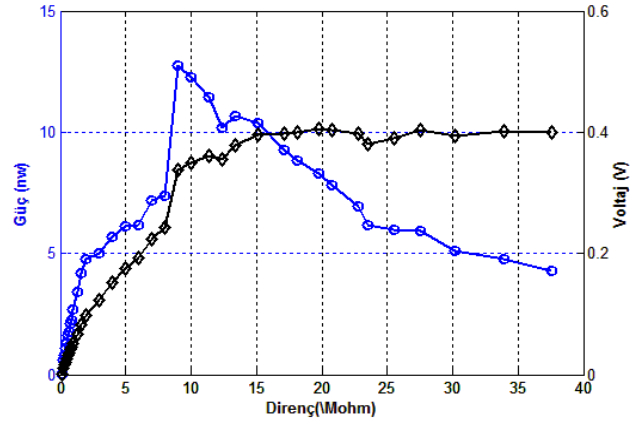
Çizelge 4.3. Nümerik, analitik ve deneysel doğal frekans sonuçları

Doğal Frekans	Teorik (Hz)	Nümerik (Hz)	Deneysel (Hz)
1. Mod	74.031	73.648	76.11



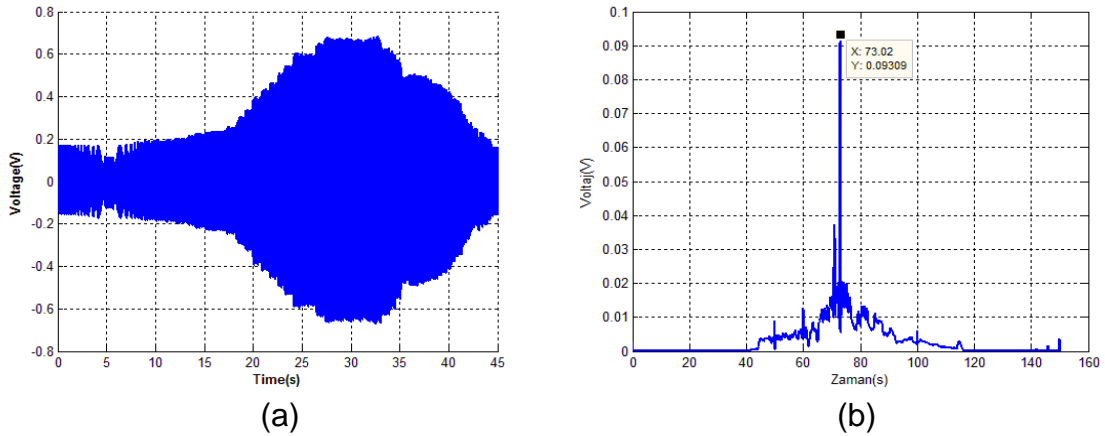
Şekil 4.18. Rezonans frekansında harmonik titreşim altında deneysel (a) ve nümerik (b) sonuçlar

Bunun yanı sıra, 3 g değerinde genlikte ve yapının rezonans frekansında tahrik edilen sistemin voltaj çıkış ve güç çıkış değerleri ölçülmüştür. Maksimum voltaj çıkış değeri 0.4 V ve güç çıkış değeri 12.73 nW (9 Mohm karşılık empedans değerinde) olarak ölçülmüştür (Şekil 4.19).

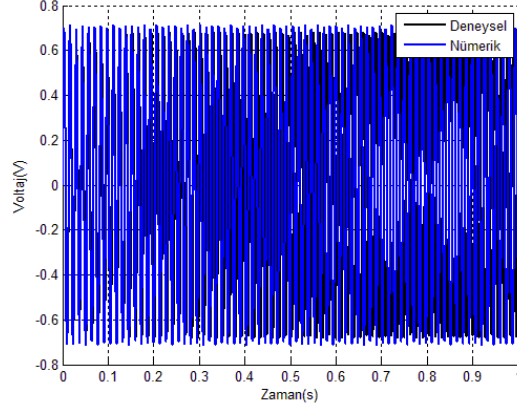


Şekil 4.19. Tek sütunlu yapı (d33 mod) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçüm sonuçları

Üçüncü konfigürasyonda, 110 μm kalınlığında PVDF film kullanılarak aynı yapı oluşturulmuştur. Bu sayede, piezoelektrik malzemenin katman kalınlığının voltaj ve güç çıkış değerlerine etkisi araştırılmıştır. Frekans taraması testinin zaman ve frekans tabanında sonuçları Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Rezonans frekansı 73.02 Hz olarak hesaplanmıştır. Bu değer önceki konfigürasyon ile tutarlıdır. Ayrıca yapının rezonans frekansında 1s süresince uygulanan harmonik titreşim altında deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.21). Ortalama nümerik hata % 3.2 olarak hesaplanmıştır.

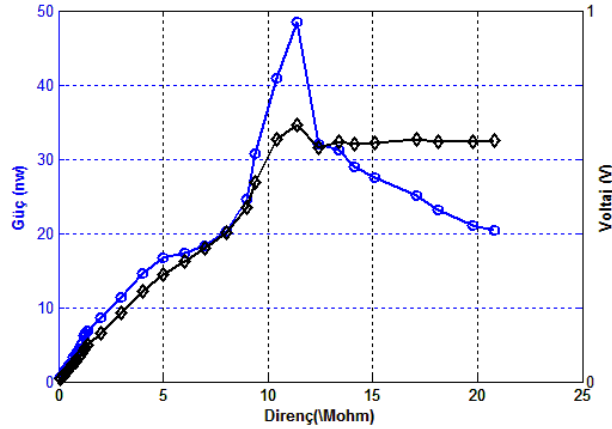


Şekil 4.20. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında



Şekil 4.21. Rezonans frekansında harmonik titreşim altında deneysel (a) ve nümerik (b) sonuçlar

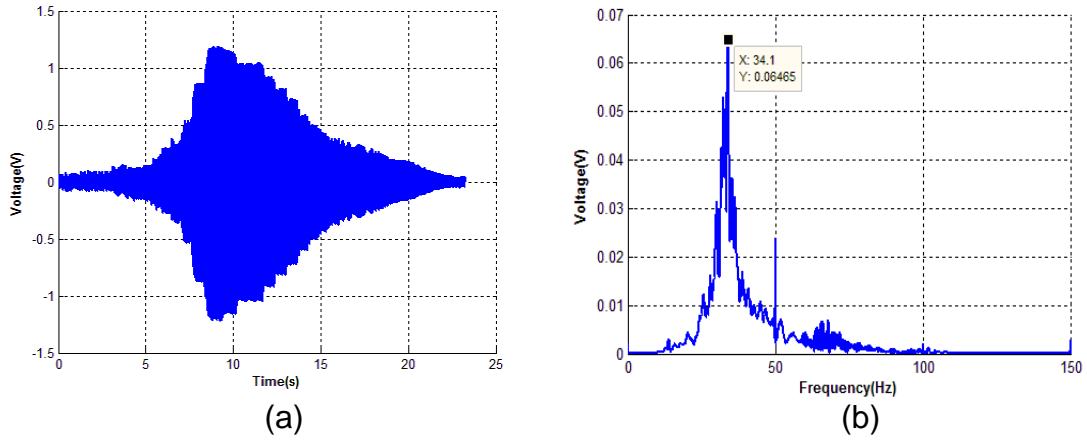
Bunun yanı sıra, maksimum voltaj çıkış değeri 0.69 V ve güç çıkış değeri 48.49 nW (11.4 Mohm karşılık empedans değerinde) olarak ölçülmüştür (Şekil 4.22). Bu konfigürasyonda piezoelektrik katman kalınlığı öncekine göre 3.92 kat artarken voltaj değerinde 1.72 kat ve güç değerinde 3.8 kat artış tespit edilmiştir.



Şekil 4.22. Tek sütunlu yapı (110 µm'lik PVDF kullanılarak) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçüm sonuçları

Dördüncü konfigürasyonda, aynı tek sütunlu polimer yapının ucuna kütle eklenmiştir. Bu sayede, uç kütleinin yapının rezonans frekansına ve voltaj ile güç çıkış değerlerine etkisi araştırılmıştır. Frekans taraması testinin zaman ve frekans tabanında sonuçları Şekil 4.23'te verilmektedir. Yapının rezonans frekansı 34.1 Hz olarak hesaplanmıştır. Bu değer analitik ve nümerik hesaplanan doğal frekans değerleri ile uygunluk göstermektedir (Çizelge 4.4). Ayrıca rezonans frekansında

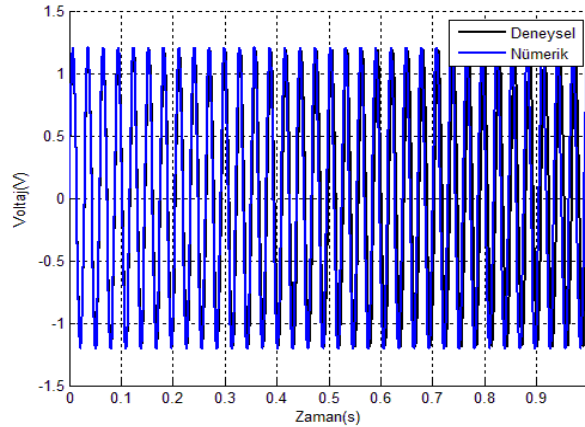
uygulanan harmonik titreşim altında da deneysel ve nümerik sonuçlar uygunluk göstermektedir (Şekil 4.24).



Şekil 4.23. Frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında

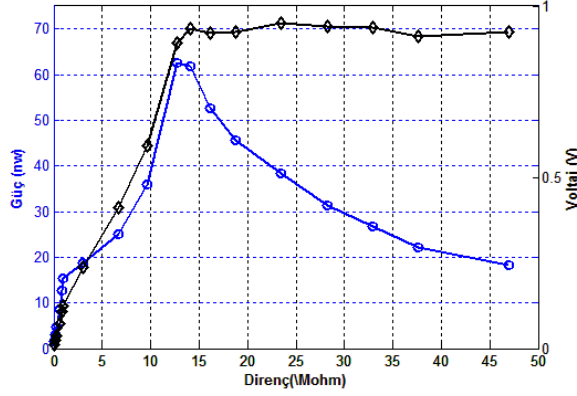
Çizelge 4.4. Nümerik, analitik ve deneysel doğal frekans sonuçları

Doğal Frekans	Teorik (Hz)	Nümerik (Hz)	Deneysel (Hz)
1.mod	34.450	34.267	34.1



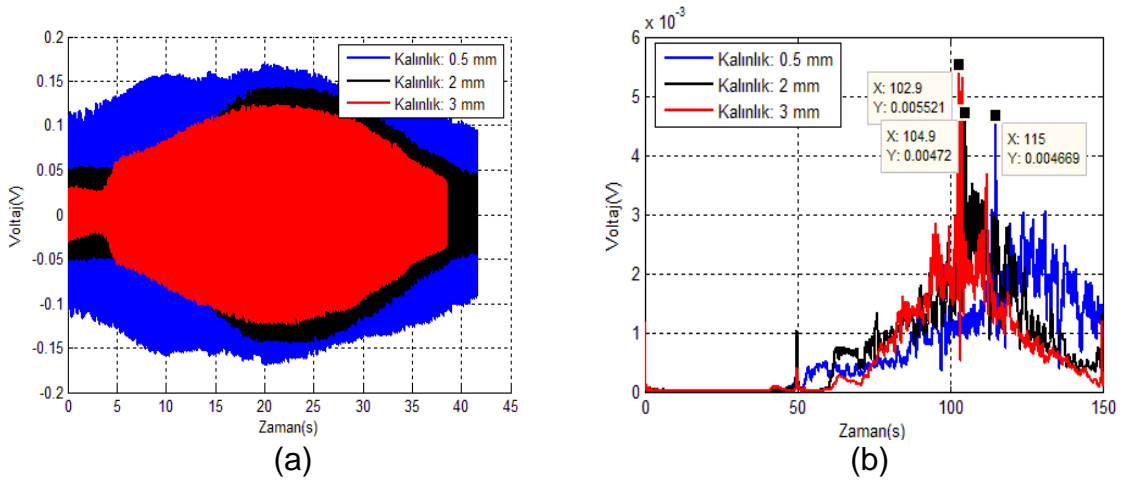
Şekil 4.24. Rezonans frekansında harmonik titreşim altında deneysel (a) ve nümerik (b) sonuçlar

Bu konfigürasyonda, maksimum voltaj çıkış değeri 0.883 V ve güç çıkış değeri 62.55 nW (12.7 Mohm karşılık empedans değerinde) olarak ölçülmüştür (Şekil 4.25). Yapıya eklenen kütle için hem yapının doğal frekansını düşürdüğü, hem de voltaj ve güç seviyelerini arttırdığı görülmektedir.

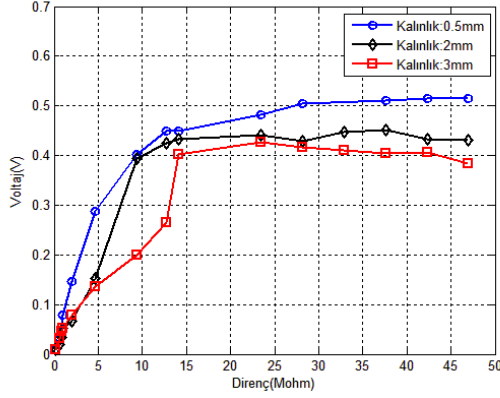


Şekil 4.25. Tek sütunlu yapı (uç kütleli) güç ve voltaj çıkış değerleri ölçüm sonuçları

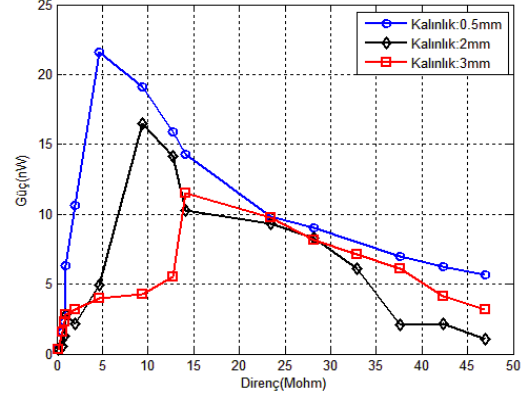
Beşinci konfigürasyon olarak farklı polimer (poliüretan) alt katman kalınlıklarına sahip tek sütunlu enerji hasadı sistemlerinin testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.26'da üç ayrı katman kalınlığına (0.5 mm, 1 mm, 2 mm) sahip polimer yapıların zaman ve frekans tabanında frekans taraması testi sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlarda, katman kalınlığı artışının voltaj seviyesini ve yapının rezonans frekansı değerini düşürdüğü görülmektedir. Rezonans frekansı değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, her bir yapının kendi rezonans frekansındaki voltaj ve güç çıkış değerleri 3 g ivme genliği değerinde sırasıyla ölçülmüştür (Şekil 4.27). Sonuçlarda, katman kalınlığı artışının yapıdan sağlanan voltaj ve güç seviyelerinde düşmeye sebep olduğu görülmektedir. Bu durum, yapının alt katman kalınlığı arttıkça yapıdan piezoelektrik elemana aktarılan enerjinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuçlar Çizelge 4.5'te özetlenmiştir.



Şekil 4.26. Tek sütunlu yapı (farklı arka katman kalınlıklarına sahip) frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında



(a)



(b)

Şekil 4.27. Tek sütunlu yapı (farklı arka katman kalınlıklarına sahip) voltaj (a) ve güç (b) çıkış değerleri ölçüm sonuçları

Çizelge 4.5. Farklı arka katman kalınlıklarının sahip yapıların frekans taraması ve voltaj / güç ölçüm testi sonuç değerleri

Özellik	İnce Katman	Orta Katman	Kalın Katman
Kalınlık (mm)	0.5	2	3
Mod-1(Doğal Frekans) (Hz) - Deneysel	115	104.9	102.9
Mod-1 (Doğal Frekans) (Hz) - Nümerik	118.2	106.4	104.3
Maksimum Voltaj (V)	0.5147	0.4504	0.4271
Maksimum Güç (nW)	21.61	16.5	11.5
Karşılık Empedans Değeri (Mohm)	4.7	9.4	14.1

4.3.2. Çok Sütunlu Enerji Hasadı Sistemi Deneyleri

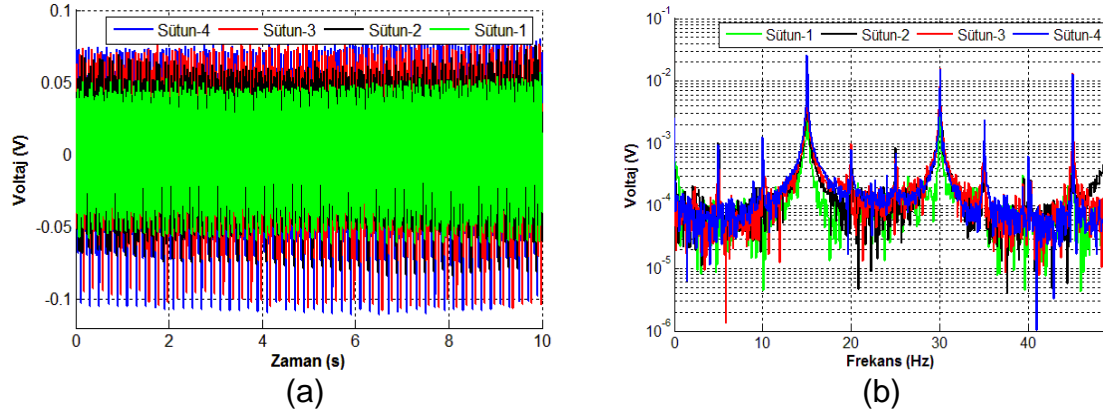
Bu kısımda Çizelge 4.1'de gösterilen 6-9 arası konfigürasyonlara sahip enerji hasadı sistemleri için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sonuçları anlatılmaktadır.

Çok sütunlu enerji hasadı sistemi testleri kapsamında öncelikle dört sütunlu polimer yapının (6. konfigürasyon) testleri gerçekleştirilmiştir. Bu yapı, dört adet farklı uzunlukta poliüretan sütundan ve 28 µm kalınlığında PVDF malzemeden meydana gelmektedir (Şekil 4.9). Yapının boyutları Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. Dört sütunlu yapının boyutları

No	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Aktif Alan (mm ²)
Sütun-1	3	12	3.53
Sütun-2	3	12.5	
Sütun-3	3	13	
Sütun-4	3	13.5	

Yapı öncelikle 15 Hz frekansta ve 3 g ivme genliğinde harmonik taban tahrik titreşimi altında test edilmiştir. Yapının zaman ve frekans tabanında cevapları Şekil 4.28’de gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği üzere maksimum voltaj değeri Sütun-4’ten elde edilmektedir. Bu durum, maksimum uç deplasmanının ve taban geriliminin en büyük uzunluk oranına sahip olan sütunda oluşmasından kaynaklanmaktadır.

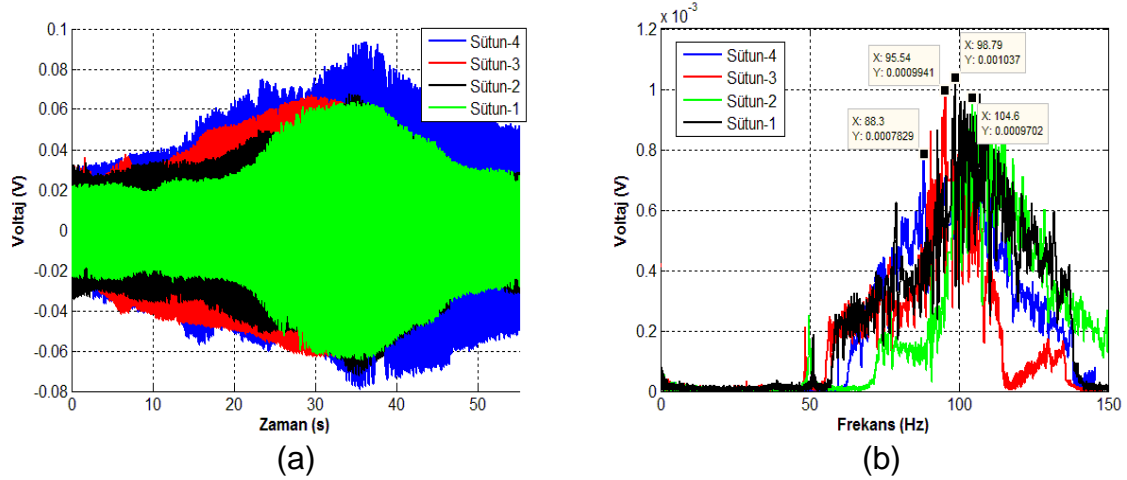


Şekil 4.28. Dört sütunlu yapı sabit harmonik titreşim testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında

Aynı yapı için 3 g genliğinde ivme altında ve 0 – 150 Hz frekans aralığında frekans taraması testi gerçekleştirilmiştir. Her bir yapının doğal frekans değeri Çizelge 4.7’de ve testin zaman ve frekans tabanında sonuçları Şekil 4.29’da gösterilmektedir. Sonuçlar nümerik sonuçlar ile uygunluk göstermektedir. Her bir sütunun doğal frekansının farklı olması geniş bantta enerji hasadı elde edilmesini sağlamaktadır.

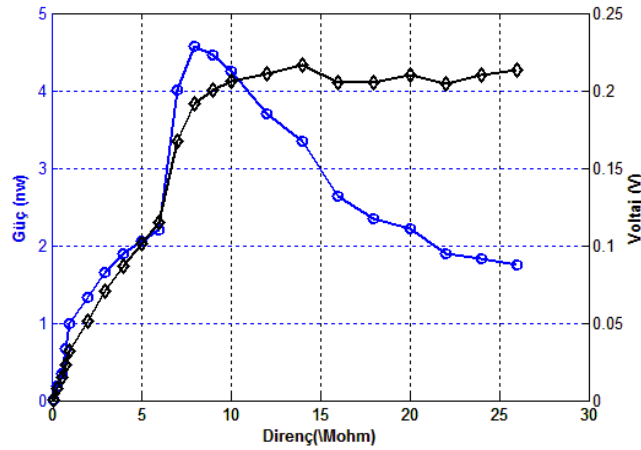
Çizelge 4.7. Dört sütunlu yapının doğal frekansları

No	Doğal Frekans (Hz) –Deneysel	Doğal Frekans (Hz) –Nümerik
Sütun-1	104.60	105.16
Sütun-2	98.79	100.47
Sütun-3	95.54	96.80
Sütun-4	88.30	90.03



Şekil 4.29. Dört sütunlu yapının frekans taraması testi sonuçları (a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında

Sistemden elde edilen toplam güç ve voltaj çıkış ölçümleri Şekil 4.30'da gösterilmektedir. Maksimum voltaj çıkışı 0.13 V ve güç çıkışı 4.58 nW (8 Mohm karşılık empedans değerinde) olarak ölçülmüştür. Bu değerler tek sütunlu yapıda ölçülen değerlerden (Konfigürasyon 1, 2, 3, 4 ve 5) daha düşüktür. Bu durum, sütunların boyutlarının küçülmesinden ve piezoelektrik eleman üzerinde kullanılan toplam aktif alanın azalmasından kaynaklanmaktadır.



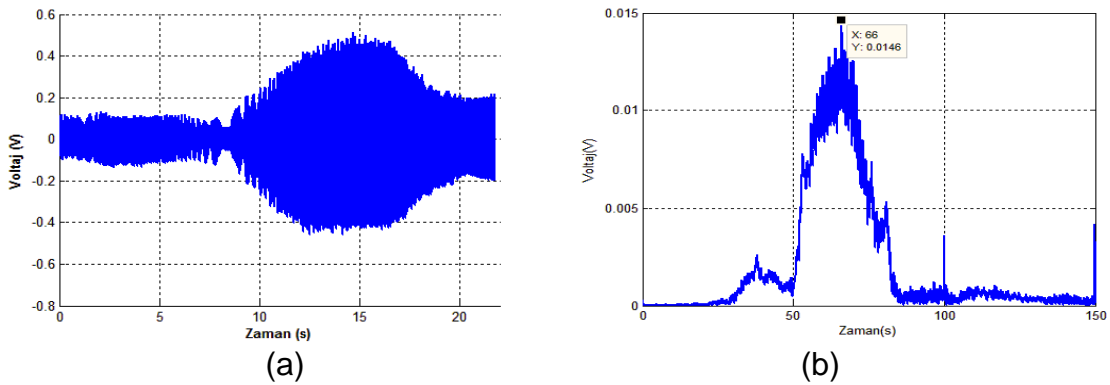
Şekil 4.30. Dört sütunlu yapının toplam güç ve voltaj çıkış değerleri ölçümü

Çok sütunlu yapıların testleri kapsamında 4 x 4 (on altılı) yapının (7.konfigürasyon) frekans taraması, voltaj ile güç çıkış ölçümü testleri gerçekleştirilmiştir. Yapıdaki her bir sütunun boyutu aynıdır ve ölçüleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Çok sütunlu yapının (7. konfigürasyon) boyutları

No	Enerji Hasadı Sistemi Tanımı	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Uzunluk Oranı	Aktif Alan (mm ²)
7	4 x 4 Sıralı Sütun (aynı boyutlarda)	1.8	12	6.6	20.4

Bu konfigürasyon ile enerji hasadı sisteminden elde edilen voltaj veya güç değerinin yapıdaki sütun sayısı ile doğru orantılı olarak değişip değişmediği araştırılmıştır. Sistem Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Piezoelektrik alt katman olarak 110 µm kalınlığında PVDF malzeme kullanılmıştır. Zaman ve frekans tabanındaki frekans taraması testi sonuçları Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Yapının doğal frekansı 66 Hz'te çıkmıştır. Bu sonuç nümerik sonuç ile uygunluk göstermektedir (Çizelge 4.9).

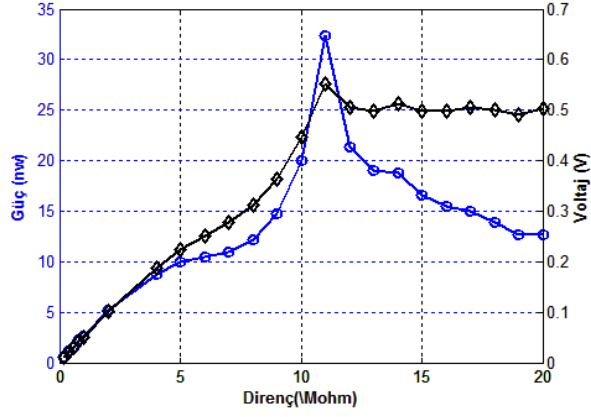


Şekil 4.31. On altı (4 x 4) sütunlu yapının frekans taraması testi (a) zaman tabanında sonuçları, (b) frekans tabanında sonuçları

Çizelge 4.9. On altı (4 x 4) sütunlu yapının doğal frekansı

No	Doğal Frekans (Hz) –Deneysel	Doğal Frekans (Hz) –Nümerik
Sütun-1	66	68.6

Bunun yanı sıra, yapıdan elde edilen voltaj çıkış ve güç çıkış ölçüm değerleri (3 g ivme genliğinde ve 66 Hz frekansta) Şekil 4.32'de gösterilmektedir. Yapıdan elde edilen maksimum voltaj 0.55 V ve maksimum güç çıkışı 32.31 nW olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, sütun sayısı ile aktif alanın ve yapıdan elde edilen voltaj ve gücün doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca piezoelektrik elemanın katman kalınlığının artışı voltaj ve güç çıkış değerlerini artırmaktadır.



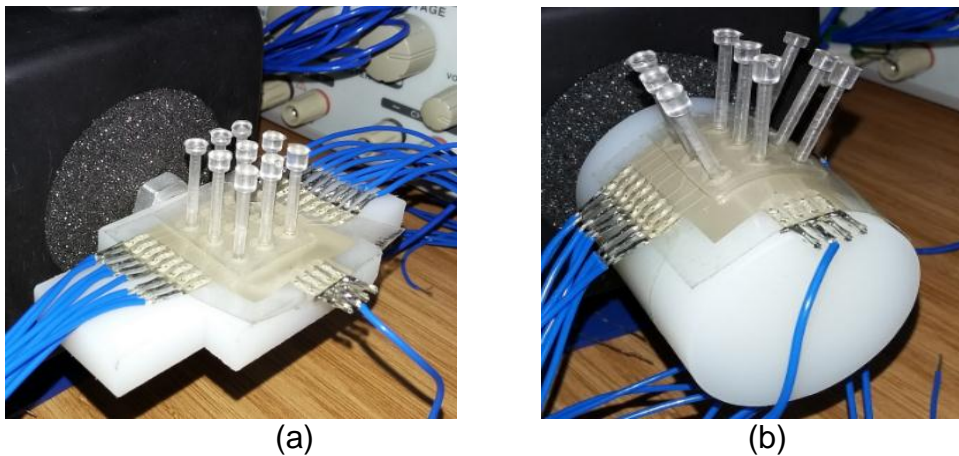
Şekil 4.32. On altı (4 x 4) sütunlu yapının toplam voltaj ve güç çıkış değerleri

Çok sütunlu yapıların testleri kapsamında 3 x 3 (dokuzlu) uç kütlelere sahip yapının (8. ve 9. konfigürasyon) düz ve eğimli zeminlerde performans testleri gerçekleştirilmiştir. Yapının boyutları Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Dokuz (3 x 3) sütunlu yapının boyutları

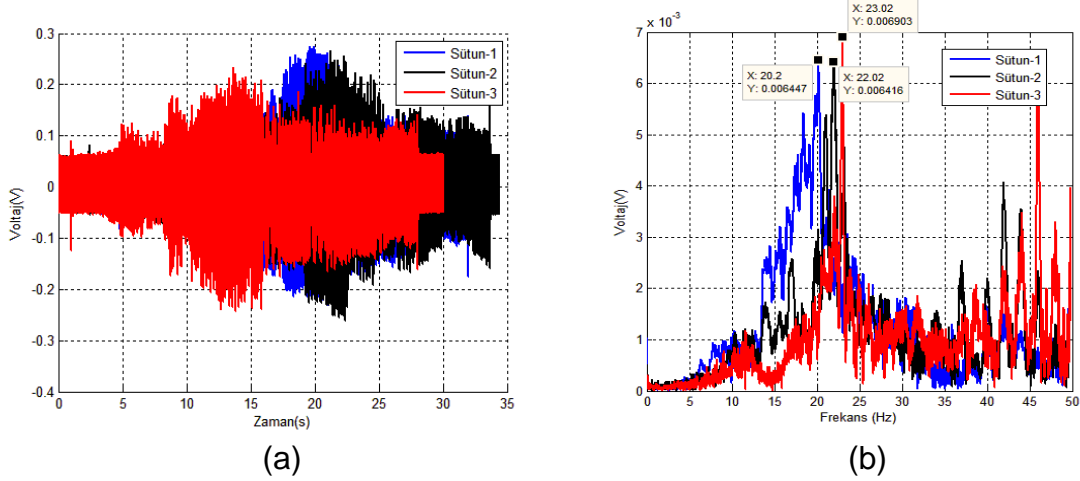
No	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Uç Kütle Çap (mm)	Uç Kütle Uzunluk (mm)	Aktif Alan (mm ²)
Sütun-1	2	16	4	2	14.13
Sütun-2	2	16	4	3	
Sütun-3	2	16	4	4	

Testlerde düz ve eğimli yüzeyler üzerine yerleştirilen sistemden elde edilen voltaj ve güç çıkış değerlerinin arasındaki farkların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda düz test tablası ve eğimli test tablası kullanılarak hazırlanan deney düzenekleri sırasıyla Şekil 4.33 (a) ve (b)’de gösterilmektedir.



Şekil 4.33. Düz (a) ve eğimli (b) test tablası üzerine yerleştirilen enerji hasadı sistemi

Yapıya 3 g ivme genliği altında ve 0 – 150 Hz arasında frekans taraması testi uygulanmıştır. Zaman ve frekans tabanında test sonuçları ve her bir sütunun rezonans frekansı değeri Şekil 4.34 ve Çizelge 4.11’de gösterilmektedir. Düz ve eğimli yüzeylerde yapılan testler rezonans frekansı değerinde herhangi bir farklılığa sebep olmamıştır.

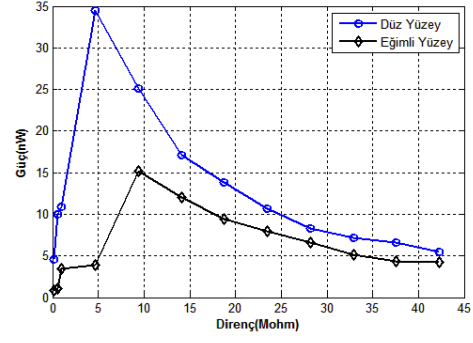
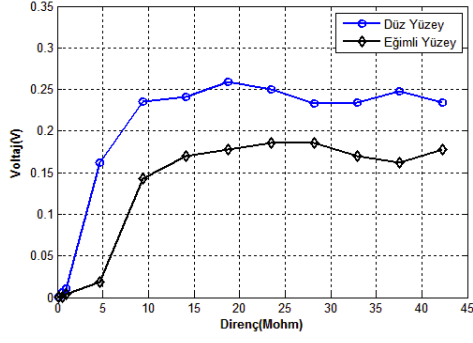


Şekil 4.34. Dokuz (3 x 3) sütunlu uç kütleli yapının frekans taraması testi sonuçları
(a) zaman tabanında, (b) frekans tabanında

Çizelge 4.11. Dokuz (3 x 3) sütunlu yapının doğal frekansları

No	Doğal Frekans (Hz) - Deneysel	Doğal Frekans (Hz) - Nümerik
Sütun-1	20.2	21.5
Sütun-2	22.02	23.5
Sütun-3	23.02	25.4

Yapıların sırasıyla düz ve eğimli yüzeylerde voltaj ve güç ölçüm testleri gerçekleştirilmiştir. Devreye bağlanan farklı empedans değerlerine karşılık gelen voltaj seviyeleri 3g değerinde ivme titreşimi altında ölçülerek toplam güç çıkışları hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.35’te gösterilmektedir. Düz tabla üzerinde gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen voltaj ve güç seviyeleri eğimli tabla üzerinde ölçülen değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, piezoelektrik filmin eğimli yüzey üzerine yapıştırıldığında d33 modunda düşme meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Maksimum voltaj ve güç çıkış değerleri Çizelge 4.12’de özetlenmiştir.



Şekil 4.35. Dokuz (3 x 3) sütunlu uç kütleli yapının düz yüzey (a) ve eğimli yüzey (b) üzerinde toplam voltaj ve güç çıkış ölçüm sonuçları

Çizelge 4.12. Maksimum voltaj ve güç ölçüm değerleri

Tip	Maksimum Voltaj (V)	Maksimum Güç (nW)	Karşılık Empedans Değeri (Mohm)
Düz Yüzey	0.2571	34.49	4.7
Eğimli Yüzey	0.1707	15.22	9.4

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, tek ve çok sütunlu polimer yapılara sahip enerji hasadı sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle tek sütunlu polimer yapıya sahip enerji hasatçı analitik ve nümerik olarak modellenmiştir. Analitik model için tek serbestlik dereceli model kullanılmıştır. Nümerik model ise, sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Serbest, harmonik ve adım tahrik titreşimleri altında analitik ve nümerik model kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılmış ve nümerik model doğrulanmıştır.

Sonraki adımda, nümerik model kullanılarak tek ve çok sütunlu polimer yapılara sahip enerji hasadı sistemlerinin farklı konfigürasyonları için titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle modal, harmonik ve geçiş analizleri üzerinde çalışılmıştır. Analiz sonuçları göz önünde bulundurularak birçok farklı konfigürasyonda enerji hasadı sistemleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Özel bir test düzeneği kurularak sistemlerin titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar frekans taraması ve harmonik titreşim altında voltaj ve güç ölçüm testlerini kapsamaktadır. Her bir konfigürasyon için deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu kısımda, farklı konfigürasyonlara sahip enerji hasadı sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen deney ve deney sonrası analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Ayrıca deney sonuçları ve literatürde var olan bir enerji hasadı sistemi için (MEAS enerji hasatçı) gerçekleştirilen test sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bunun yanı sıra benzer konularda gerçekleştirilecek çalışmalara yönelik öneriler bu bölümde anlatılmaktadır.

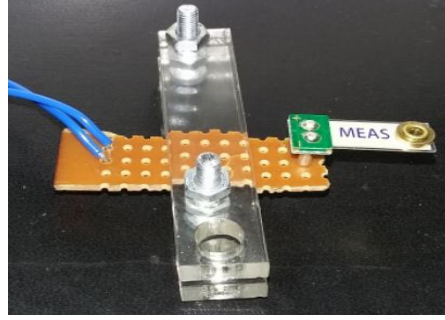
5.1. Sonuçlar

Enerji hasadı sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması amacıyla literatürde en çok kullanılan terimler sırasıyla güç yoğunluğu, normalize güç yoğunluğu, performans katsayısı ve güç veya enerji verimi olarak sıralanmaktadır. Bu terimlerin açıklamaları ve formülasyonları Bölüm 2.1.2'de verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan her bir enerji hasadı sistemi tipi için bu parametreler hesaplanmıştır (Çizelge 5.1). Testlerde uygulanan giriş tahrik ivme değeri 3 g seviyesindedir. Bunun yanı sıra 5 ve 6. konfigürasyonlarda poliüretan, diğer sistemlerde PDMS malzemedenden polimer sütunlar üretilmiştir.

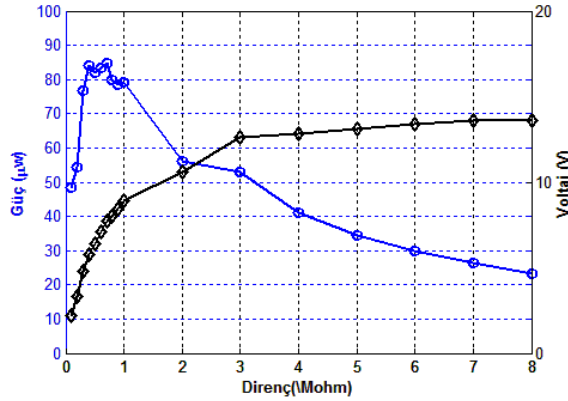
Çizelge 5.1. Enerji hasadı sistemleri performans değerleri

No	Enerji Hasadı Sistemi Tanımı	PVDF katman kalınlığı (µm)	Aktif Alan (mm ²)	Frek. (Hz)	Güç Yoğ. (µW / cm ³)	Norm. Güç Yoğ. (kgs / m ³)	Perf. Kats.	Verim (%)
1	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	28	39.3	64	5.31 e4	61.3	3.6	15.6
2	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	28	39.3	76	11.5	1.3 e-2	6.62 e-4	0.037
3	Tekli Sütun (uç kütsesiz)	110	39.3	73	112	0.132	9.12 e-3	0.14
4	Tekli Sütun (uç kütleli)	110	39.3	34	145	0.167	2.52 e-3	0.037
5.1	Tekli Sütun (İnce katmanlı poliüretan)	110	39.3	115	50	5.77 e-2	2.58 e-3	0.068
5.2	Tekli Sütun (Orta katmanlı poliüretan)	110	39.3	105	38.2	4.41 e-2	2.16 e-3	0.054
5.3	Tekli Sütun (Kalın katmanlı poliüretan)	110	39.3	103	26.6	3 e-2	1.53 e-3	0.039
6	Dörtlü Sütun (farklı uzunluklarda)	28	3.53	95	11.6	1.33 e-2	7.44 e-4	0.079
7	4 x 4 Sıralı Sütun (aynı boyutlarda)	110	20.3	66	9.01	1 e-2	4 e-3	0.32
8	3 x 3 Sıralı Sütun (uç kütleli, düz yüzeyde)	110	14.1	22	13.9	1.6 e-2	2.08 e-3	0.19
9	3 x 3 Sıralı Sütun (uç kütleli, eğimli yüzeyde)	110	14.1	22	6.12	0.7 e-2	9.2 e-4	0.084

Bunun yanı sıra, MEAS MiniSense 100 titreşim sensörü [52] kullanılarak üretilen enerji hasadı sistemi üzerinde benzer testler uygulanmıştır. Enerji hasadı sisteminin fotoğrafı Şekil 5.1’de gösterilmiştir. 1 g ivme genliği altında ve 75 Hz frekans değerinde sistemin voltaj ve güç çıkış eğrileri çıkarılmıştır (Şekil 5.2). Bu kapsamda sistem için hesaplanan performans parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. MEAS Enerji Hasadı Sistemi



Şekil 5.2. MEAS enerji hasadı sistemi voltaj ve güç çıkış eğrisi

Çizelge 5.2. MEAS enerji hasadı sistemi performans değerleri

Enerji Hasadı Sistemi Tanımı	Frek. (Hz)	Maksimum Güç Çıkışı (µW)	Güç Yoğ. (µW / cm ³)	Norm. Güç Yoğ. (kgs / m ³)	Perf. Kats.	Verim (%)
MEAS Enerji Hasatçı	75	84.7	1100	11.46	4.65 e-2	10.55

Enerji hasadı sistemlerinin performansları aynı test koşulları altında karşılaştırılabilir. Bu kapsamda öncelikle 1. tip sistemin diğerlerinden ayrılması gereklidir. Bu sistemden d33 ve d31 modlarının katkısı sayesinde yüksek voltaj ve

güç elde edilebilmektedir. Sistem, MEAS enerji hasatçı ile karşılaştırıldığında daha yüksek performans özelliklerine sahiptir. Fakat önceki bölümde belirtildiği üzere, sistemin kararlı bir yapı göstermemesi ve aynı koşullar altında farklı sonuçlar vermesi sebebiyle bu konfigürasyon ile çalışmalara devam edilmemiştir. Tez kapsamında tasarlanan diğer enerji hasadı sistemleri ise, sadece d33 modunda çalışmaktadır. Bu yüzden ilk konfigürasyondan daha düşük değerlerde performans sonuçları elde edilmiştir. Aynı zamanda, tasarlanan enerji hasadı sistemleri kararlı bir yapı göstermektedir ve test sonuçları tekrarlanabilmektedir.

28 µm kalınlığında PVDF kullanılan 2. ve 6. konfigürasyonlar karşılaştırıldığında, enerji hasadı sistemlerinin benzer güç yoğunluğu, normalize güç yoğunluğu ve performans katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Daha düşük boyutsal özelliklere sahip dört sütunlu enerji hasatçı kullanılarak hem performans kaybı yaşanmamış, hem de geniş bantta enerji hasadı sağlanmıştır. Bunun yanı sıra, dörtlü sütun yapısının güç verimi daha yüksektir. Bu durum, dörtlü yapının kütleli olarak tekli yapıdan daha düşük değerde olmasından kaynaklanmaktadır.

Farklı piezoelektrik katman kalınlıklarına sahip enerji hasadı sistemleri karşılaştırıldığında (Konfigürasyon 2 ve 3); yaklaşık 4 katlık katman kalınlığı artışı ile 10 katlık güç yoğunluğu, normalize güç yoğunluğu ve performans katsayısı artışı sağlandığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, sistemin verimi de yaklaşık 4 kat artış göstermektedir. Bu durum, piezoelektrik elemandan elde edilen voltajın, elemanın kalınlığı ile direk doğru orantılı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır.

Tek sütuna sahip uç kütleli ve uç kütsüz enerji hasadı sistemleri karşılaştırıldığında (3 ve 4 no'lu konfigürasyonlar); uç kütleli enerji hasatçının daha yüksek güç yoğunluğu ve normalize güç yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Uç kütle, hem sistemin doğal frekansının düşmesini, hem de uç titreşimlerin salınımlarının genliğinin artmasını sağlamaktadır. Bu yüzden, daha yüksek oranda güç elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, uç kütleli sistemin ağırlığından dolayı sistemin performans katsayısı ve veriminde bir miktar düşme meydana gelmiştir. Bu kapsamda, düşük frekanslı titreşimler için uç kütleli enerji hasadı sistemlerinin kullanılması ve uç kütleli sistemin veriminde herhangi bir kayıp olmayacak şekilde optimize edilmesi gereklidir.

Tek sütunlu ve farklı arka katman kalınlıklarına sahip olan aynı tipteki poliüretan sütunlara (5.1, 5.2 ve 5.3 no'lu konfigürasyonlar) sahip enerji hasatçıların performansları karşılaştırıldığında, ince katmana sahip hasatçının daha yüksek performans özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, katman kalınlığının voltaj ve gına olumsuz etki ettiğini göstermektedir. Bu durum, polimer arka katman kalınlığı arttıka polimer sütundan piezoelektrik alt katmana aktarılan enerjinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, enerji hasatçıdan daha yüksek voltaj ve g elde edebilmek için olabildiğince ince arka katmana sahip enerji hasatçılar üzerinde çalışmaların devam etmesi gereklidir.

Uç kütlesiz poliüretan sütuna (Konfigürasyon:5.1) ve PDMS sütuna (Konfigürasyon:3) sahip enerji hasadı sistemleri karşılaştırıldığında, daha düşük sertliğe sahip PDMS sütunlu enerji hasatçıdan daha yüksek oranda performans özellikleri elde edilmiştir. Yapının düşük sertlikte olması, uç titreşimlerin artmasını ve daha yüksek voltaj ve g elde edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda daha esnek bir enerji hasadı sistemi elde edilmektedir. Fakat yapının sertliğinin artması da, tabanda oluşan gerilme yığılmalarının artmasını sağlamaktadır. Bu durum, nümerik simülasyon çalışmalarında gösterilmiştir. Bu yüzden, polimer sütunun sertlik değerinin hasatçıdan maksimum voltaj ve g elde edilecek şekilde optimize edilmesi gereklidir.

Konfigürasyon 7 ile gösterilen 16 sütunlu (4 x 4) enerji hasadı sistemi ile tek sütunlu uç kütlesiz ve uç kütleli (Konfigürasyon: 3 ve 4) hasatçıların performansları karşılaştırdığında, on altı sütunlu hasatçının g yoğunluğu ve normalize g yoğunluğu değerlerinin daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, hasatçının hem hacimsel olarak daha küçük polimer sütunlara sahip olmasından, hem de aktif alanın daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, verim değerini tek sütunlu hasatçılardan çok daha yüksektir. Bu durum, hasatçının düşük ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Yani, polimer sütun sayısının artması, hasatçının verimini arttırırken, g yoğunluğunun düşmesine sebep olmuştur. Hasatçıdan elde edilen g yoğunluğunun artması için, polimer sütun sayısının ve dolayısıyla sütunlar altında kalan aktif alanın artması gereklidir.

Konfigürasyon 8 ve 9'da gösterilen 9'l ve uç kütleli sütun yapısına sahip enerji hasadı sistemlerinin düz ve eğimli yüzeylerdeki performansları karşılaştırıldığında,

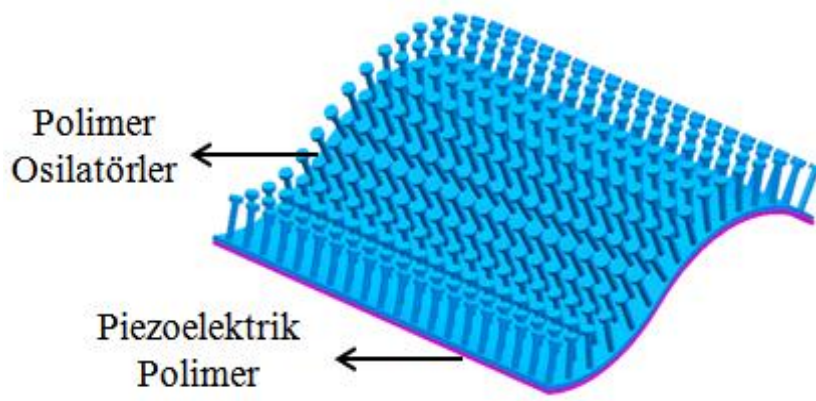
düz zeminde test edilen hasatçının daha yüksek performans özellikleri gösterdiği görülmüştür. Sistemin verimi yaklaşık % 45 oranında düşmüştür. Bu durum, önceki bölümde belirtildiği üzere eğimli yüzey üzerine yerleştirilen ve sabitlenen piezoelektrik malzemenin özelliklerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Enerji hasadı sisteminin eğimli yüzeylerde de kullanılabilir olması çok büyük bir avantaj sağlamaktadır. Sistemin eğimli yüzey üzerindeki performansının iyileştirilmesi amacıyla nümerik ve deneysel çalışmaların yürütülmesi gereklidir.

Konfigürasyon 8'de gösterilen dokuzlu ve uç kütleli enerji hasadı sistemi ile on altılı ve uç kütleli hasatçı (Konfigürasyon: 7) karşılaştırıldığında, uç kütleli hasatçıdan daha az aktif alana sahip olmasına rağmen, daha yüksek güç yoğunluğu elde edildiği görülmüştür. Bu durum, sütunlar üzerindeki uç kütleli etkisini göstermektedir. Ayrıca, titreşim sarsıcı tarafından aynı ivme seviyesinde ve her bir konfigürasyonun kendi rezonans frekansında titreşim uygulandığı için, uç kütleli hasatçıya uygulanan taban deplasmanı daha yüksektir. Bu durumun da, daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmesinde katkısı bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, uç kütleli konfigürasyon çok daha düşük frekanslı titreşimler için kullanılabilir. Fakat sistemin verimi ise, uç kütleli yapı ile azalmıştır. Bu yüzden, sistem veriminin optimize edilecek şekilde uç kütleli enerji hasadı sisteminin tasarlanması gereklidir.

5.2. Öneriler

Bu bölümde, bu çalışmanın geliştirilebilmesi ve bu alanda yürütülen faaliyetlere destek olunması amacıyla öneriler yer almaktadır.

Tez kapsamında tasarlanan enerji hasadı sistemlerinin temel çalışma prensibi, bir piezoelektrik alt katman üzerinde yer alan osilatörler tarafından mekanik titreşimler esnasında depolanan elastik enerjinin, piezoelektrik eleman vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Yürütülen çalışmalarda, osilatör olarak adlandırılan polimer sütunların piezoelektrik eleman üzerindeki sayısı ile doğru orantılı olarak sistemden elde edilen voltaj ve güç seviyelerinin arttığı görülmüştür. Bu kapsamda, çok sütunlu yapılara sahip esnek enerji hasadı sistemlerinin tasarımı başlığı altında ileride birçok teorik ve deneysel çalışma yürütülebilir. Deri üzerinde yama şeklinde kullanılacak enerji hasadı sisteminin kavramsal bir tasarım çizimi Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Enerji Hasadı Sistemi Kavramsal Tasarım Örneği

Bunun yanı sıra, ileride polimer sütunlar ile piezoelektrik katman arasındaki enerji transferinin optimize edilmesi üzerine çalışmaların yürütülmesi gereklidir. Enerji hasadı sistemlerinin verimi Çizelge 5.1’te gösterildiği üzere çok düşüktür. Bu durum, polimer sütunların titreşim hareketi esnasında esnek yapıya sahip olmalarından dolayı, depoladıkları mekanik enerjinin piezoelektrik elemana aktarılamadan sönmülmesine sebep olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden düşük sönüm oranına sahip osilatörler kullanılarak giriş mekanik enerjisinin büyük çoğunluğunun piezoelektrik elemana aktarılması gereklidir. Fakat bu durum, osilatörlerin uç deplasman genliklerinin düşmesine ve tabanda oluşacak gerilmelerin azalmasına yol açacaktır. Bu kapsamda, polimer sütunların sönüm oranının belirlenmesine yönelik optimizasyon çalışmalarının yürütülmesi gereklidir.

İleride yürütülecek çalışmalarda, düşük frekanslı titreşimler için kullanılacak uç kütlelerin boyutlarının optimize edilmesi ve sistemin enerji verimliliğinin düşmesine sebep olmaması gereklidir.

Enerji hasadı sistemlerinin tasarımında kritik görülen bir diğer nokta, polimer alt katman kalınlığıdır. Üretim aşamasında polimer alt katman kalınlığı ne kadar ince üretilirse, o kadar yüksek voltaj ve güç seviyeleri elde edilmektedir. Fakat alt katmanın ince olması, kullanım esnasında katmanın yırtılmasına, ezilmesine vb. sebep olabilir. Bu yüzden daha hassas bir şekilde çalışmaların yürütülmesi gereklidir.

Enerji hasadı sistemlerinden hasat edilen enerji, piezoelektrik eleman üzerinde bulunan elektrotların aktif olarak kullanılan kısmının alanı ile doğru orantılıdır. Bu çalışma kapsamında, yarım veya çeyrek elektrotlu tasarımlara sahip olan

piezoelektrik elektrotların sadece bir tarafında yer alan kısımlarından voltaj ve güç çıkışı elde edilmiştir. İleride yürütülecek faaliyetlerde, her iki tarafta bulunan elektrotların aynı anda kullanılması için gerekli olan elektriksel devrenin kurulması gereklidir. Bu sayede, sistemden elde edilen voltaj iki katına ve güç dört katına çıkabilecektir. Bu durumda, sistemin verimi büyük oranda artacaktır.

Enerji hasatçılardan elde edilen voltaj ve güç miktarı, piezoelektrik elemanın kalınlığı ile doğru orantılı olarak değiştiği bu çalışma kapsamında gösterilmiştir. İleride, çoklu piezoelektrik katmanlar kullanılarak enerji hasadı sistemlerinin tasarlanması ve güç çıkışlarının optimize edilmesi üzerine çalışmalar yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Harrop, P., Zervos, H., Batteries, Supercapacitors, Alternative Storage for Portable Devices 2009-2019, *IDTechEx*, **2009**.
- [2] Worthington, E., *Piezoelectric Energy Harvesting: Enhancing Power Output by Device Optimisation and Circuit Techniques*, Doktora Tezi, Cranfield University, School of Applied Sciences Microsystems and Nanotechnology Centre Department of Materials, Cranfield, İngiltere, **2010**.
- [3] Fry, D. N., Holcomb, D. E., Munro, J. K., Oakes, L. C., Maston, M. J., Compact Portable Electric Power Sources, *Instrumentation and Controls Division*, vol. 27, **1997**.
- [4] Boisseau, S., Despesse, G., Seddik, B.A., Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, *Small-Scale Energy Harvesing*, pp. 1–39, **2012**.
- [5] El-hami, M., Glynn-Jones, P., White, N. M., Hill, M., Beeby, S., James, E., Brown, D., Ross, J. N., Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator, *Sensors Actuators A Physics*, vol. 92, no. 1–3, pp. 335–342, **2001**.
- [6] Beeby, S., Tudor, M., White, N., Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technoogy*, vol. 175, **2006**.
- [7] Cavallier, B., Berthelot, P., Nourira, H., Foltête, E., Hirsinger, L., Ballandras, S., Energy harvesting using vibrating structures excited by shock, *Procedia IEEE International Ultrasonics Symposium*, vol. 2, pp. 943–945, **2005**.
- [8] Minazara, E., Vasic, D., Costa, F., Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibration Energy to Supply Portable Devices, *Proceedings of International Conference on Renewable Energies And Power Quality*, Santander, Spain, **2008**.
- [9] Kim, H., Bedekar, V., Islam, R. A., Lee, W.H., Leo, D., Priya, S., Laser-machined piezoelectric cantilevers for mechanical energy harvesting, *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 55, no. 9, pp. 1900–5, Sep. **2008**.
- [10] Makki, N., Pop-Iliev, R., Piezoelectric power generation in tires, *SPIE Newsroom*, November, **2011**.

- [11] Fourie, D., Shoe-Mounted PVDF Piezoelectric Transducer for Energy Harvesting, *MIT Undergraduate Research Journal* 19, pp. 66-70, Spring **2010**.
- [12] Chilibon, I., Dias, C., Inacio, P., PZT and PVDF bimorph actuators, *Journal of Optoelectronics and Advanced Material*, vol. 9, no. 6, pp. 1939–1943, **2007**.
- [13] Jiang, Y., Shiono, S., Hamada, H., Fujita, T., Higuchi, K., Maenaka, K., “Low-frequency Energy Harvesting using A Laminated PVDF Cantilever with A Magnetic Mass, *Procedia PowerMEMS 2010*, pp 375–378, **2010**.
- [14] Roundy, S., Wright, P. K., A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, *Smart Materials and Structures*, vol. 13, no. 5, pp. 1131–1142, **2004**.
- [15] Mitcheson, P.D., Reilly, E.K., Toh, T., Wright, P.K., Yeatman, E.M., Transduction Mechanisms and Power Density for MEMS Inertial Energy Scavengers, *Procedia PowerMEMS 2006*, Berkeley, USA, **2006**.
- [16] Dutoit, N.E., Wardle, B. L., Kim, S.-G., Design Considerations for Mems-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters, *Integrated Ferroelectrics*, vol. 71, no. 1, pp. 121–160, **2005**.
- [17] Beeby, S., Tudor, M., White, N., Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 12, **2006**.
- [18] Yazıcı, E.Y., Alp, İ., Yılmaz, A. O. Celep, O., Piezoelektrik Teknoloji ve Piezo-Malzeme Olarak Turmalin, *5.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, pp. 13–14, **2004**.
- [19] Dineva, P., Gross, D., Müller, R., Rangelov, T., *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials*, vol. 212, **2014**.
- [20] Heywang, W., Lubitz, K., Wersing, W., *Piezoelectricity - Evolution and Future of a Technology*, **2008**.
- [21] Li, H., Tian, C., Deng, Z.D., Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials, *Applied Physics*, vol. 1, no. 4, **2014**.
- [22] Tiwari, R., Study of different Energy Scavenging Techniques through Vibration and its Micro Power Applications, *International Journal of Computer Applications*, vol. 68, no. 19, pp. 17–23, **2013**.

- [23] Kim, H.S., Kim, J.H., Kim, J., A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, **2011**.
- [24] Zuo, L., Tang, X., Large-scale vibration energy harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 24, no. 11, pp. 1405–1430, **2013**.
- [25] Roundy, S., Wright, P. K., Rabaey, J., A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer Communications*, vol. 26, no. 11, pp. 1131–1144, **2003**.
- [26] Sodano, H.A., Park, G., Inman, D.J., Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting, *Strain*, vol. 40, no. 2, pp. 49–58, **2004**.
- [27] Zhu, D., Almusallam, A., Beeby, S.P., Tudor, J., Harris, N.R., A Bimorph Multi-layer Piezoelectric Vibration Energy Harvester, *Power MEMS 2010*, Leuven, Belgium, **2010**.
- [28] Chalasani, S., Conrad, J. M., A survey of energy harvesting sources for embedded systems, *Conference Procedia IEEE Southeastcon*, pp. 442–447, **2008**.
- [29] Stewart, M., Weaver, P.M., Cain, M., Charge redistribution in piezoelectric energy harvesters, *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 7, pp. 2010–2013, **2012**.
- [30] Dhakar, L., Liu, H., Tay, F.E.H., Lee, C., A new energy harvester design for high power output at low frequencies, *Sensors Actuators A Physics*, vol. 199, pp. 344–352, **2013**.
- [31] Han, M., Zhang, X., Liu, W., Sun, X., Peng, X., Zhang, H., Low-frequency wide-band hybrid energy harvester based on piezoelectric and triboelectric mechanism, *Science China Technological Sciences*, vol. 56, no. 8, pp. 1835–1841, **2013**.
- [32] Liu, H., Lee, C., Kobayashi, T., Tay, C. J., Quan, C., A new S-shaped MEMS PZT cantilever for energy harvesting from low frequency vibrations below 30 Hz, *Microsystem Technologies*, vol. 18, no. 4, pp. 497–506, **2012**.
- [33] Soliman, M.S.M., Abdel-Rahman, E.M., El-Saadany, E.F., Mansour, R. R., A wideband vibration-based energy harvester,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 11, p. 115021, **2008**.

- [34] Jones P.G., Beeby, S.P., White, N.M., Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator, *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings*, vol. 148, no. 2, **2001**.
- [35] Leland, E.S., Baker, J., Reilly, E., Otis, B., Rabaey, J. M., Wright, P.K., Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers, *Pervasive Computing, IEEE*, pp. 28-36, **2005**.
- [36] Muthalif A.G.A., Nordin, N.H.D., Optimal piezoelectric beam shape for single and broadband vibration energy harvesting: Modeling, simulation and experimental results, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 54–55, pp. 417–426, **2015**.
- [37] Park, J., Lee, S., Kwak, B. M., Design optimization of piezoelectric energy harvester subject to tip excitation †, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 137–143, **2012**.
- [38] Markose, S., Patange, S.R., Raja, S., Jain, A., Elias, B., Experimental Study on Dimension Effect of PVDF Film on Energy Harvesting, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, pp. 270–278, **2013**.
- [39] Measurement Specialties Inc., Piezo Film Sensors Technical Manual, <http://www.contactmicrophones.com/techman.pdf> (**2006**).
- [40] Khaligh, A., Zeng, P., Zheng, C., Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies, State of the Art, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 3, pp. 850–860, **2010**.
- [41] Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J., Gershenfeld, N., Parasitic power harvesting in shoes, *Dig. Pap. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No.98EX215)*, **1998**.
- [42] Shenck N.S., Paradiso, J., Energy Scavenging With Shoe Mounted Piezoelectrics, *IEEE Micro*, 21(3), pp. 30–42, **2001**.
- [43] Hausler, E., Stein, E., Implantable physiological power supply with PVDF film, *Ferroelectrics*, 60, 277-82, **1984**.
- [44] Ramsey, M.J., Clark, W.W., Piezoelectric Energy Harvesting for Bio MEMS Applications, *Proceedings of SPIE's 8th Annual Smart Materials and Structures Conference*, Vol. 4332, Newport Beach, CA, pp. 429–438, **2001**.

- [45] Shen, D., Choe, S.-Y., Kim, D.-J., Analysis of Piezoelectric Materials for Energy Harvesting Devices under High-g Vibrations, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 10A, pp. 6755–6760, **2007**.
- [46] Patel, I., Siores, E., Shah, T., Utilisation of smart polymers and ceramic based piezoelectric materials for scavenging wasted energy, *Sensors Actuators A Physics*, vol. 159, no. 2, pp. 213–218, **2010**.
- [47] Zhang, L., Oh, S.R., Wong, T.C., Tan, C.Y., Yao, K., Piezoelectric polymer multilayer on flexible substrate for energy harvesting, *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 60, no. 9, pp. 2013–2020, **2013**.
- [48] Vatansever, D., Hadimani, R.L., Shah, T., Siores, E., An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT, *Smart Material Structures*, vol. 20, no. 5, p. 055019, **2011**.
- [49] Erturk, A., Inman, D. J., *Piezoelectric Energy Harvesting*, Wiley, **2011**.
- [50] ANSYS Inc., Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/ans_thry.pdf, **2009**.
- [51] Du, P., Lin, I.-K., Lu, H., Zhang, X., Extension of the beam theory for polymer bio-transducers with low aspect ratios and viscoelastic characteristics, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 9, p. 095016, Sep. **2010**.
- [52] Measurement Specialties Inc., MiniSense 100 Vibration Sensor, Datasheet, https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MiniSense_100.pdf (**2008**)

EKLER

EK-1 PİEZOELEKTRİK MALZEME (PVDF) ÖZELLİKLERİ

Piezoelektrik Özellikleri	
d_{33} (pC/N)	$15 \pm \% 20$
d_{31} (pC/N)	$6 \pm \% 20$
d_{32} (pC/N)	$1 \pm \% 20$
g_{33} (Vm/N) at 1 kHz	$0.14 \pm \% 20$
p_3 ($\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$)	$-25 \pm \% 25$

Dielektrik Özellikleri	
ϵ_r at 0.1 kHz	$11.5 \pm \% 10$
ϵ_r at 1 kHz	$11.5 \pm \% 10$
ϵ_r at 10 kHz	$11 \pm \% 10$
DC voltaj	$670 \pm \% 30$

Mekanik Özellikler	
Elastik Modül (MPa) – eksenel yönde	$3200 \pm \% 20$
Elastik Modül (MPa) – yanal yönde	$3200 \pm \% 20$
Gerilme mukavemeti (MPa) – eksenel yönde	$240 \pm \% 15$
Gerilme mukavemeti (MPa) – yanal yönde	$60 \pm \% 15$
Uzama (%) – eksenel yönde	$20 \pm \% 30$
Uzama (%) – yanal yönde	$5 \pm \% 30$

Isıl Özellikler	
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	$175 \pm \% 5$

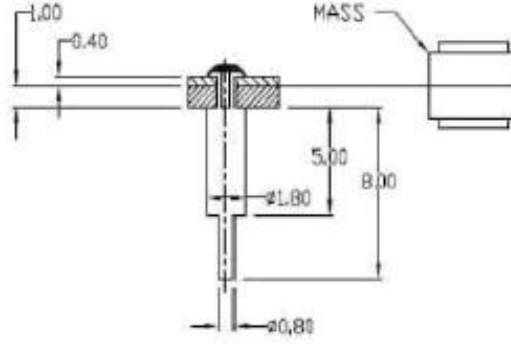
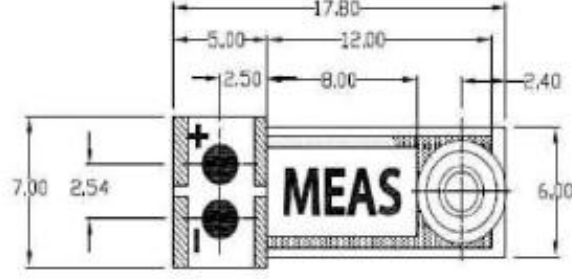
EK-2 PDMS MALZEME ÖZELLİKLERİ

Viskozite (Taban) (cP)	5100
Viskozite (Karma) (cP)	3500
Isıl iletkenlik (W/m [°] K)	0.27
Özgül ağırlık	1.03
Çalışma Zamanı (25°C) (saat)	1.5
Kür Zamanı (100°C) (saat)	48
Sertlik (Shore)	43
Dielektrik Mukavemeti (kV/mm)	19
Dielektrik Mukavemeti (Volts/mil)	500
Hacimsel Direnç (ohm.cm)	2.9e+14
Sönüm Faktörü (100 Hz)	0.00257
Sönüm Faktörü (100 kHz)	0.00133
Dielektrik Katsayısı (100 Hz)	2.72
Dielektrik Katsayısı (100 kHz)	2.68
Gerilme Mukavemeti (MPa)	6.7

EK-3 POLİÜRETAN MALZEME ÖZELLİKLERİ

Poliüretan Tipi	L42	L100	L167	L315
Sertlik (ASTM d676-59T)	80A	90A	95A	75D
Özgül Ağırlık	1.07	1.10	1.13	1.21
Gerilme Mukavemeti (MPa) (ASTM D412-61T)	20.7	31.0	34.5	62.0
Uzama (%) (ASTM D412-61T)	800	450	400	270
%100 Modül (MPa) (ASTM D412-61T)	2.8	7.6	12.4	32.0
Elastikiyet (%)	-	45	40	45
Baskı kuvveti ile ezilme (Metot B) (ASTM D395)	45	27	40	-
Baskı kuvveti ile ezilme (Metot A) (ASTM D395)	-	9	10	10
Aşınma Endeksi (%) (ASTM D1630)	110	175	400	435
Yırtılma Mukavemeti (kN/m) (ASTM D470)	12.2	13.1	26.2	192.2

EK-4 MEAS MINISENSE 100 TİTREŞİM SENSÖRÜ ÖZELLİKLERİ



1005939-1

Minisense 100H (P/N 101005939-1)

Parametre	Değer
Voltaj Hassasiyeti (açık devre) (V/g)	1.1
Voltaj Hassasiyeti (Rezonans frekansında) (V/g)	6
Yük Hassasiyeti (pC/g)	260
Rezonans Frekansı (Hz)	75
Üst sınırlayıcı frekans (Hz)	42
Doğrusallık (%)	± 1
Kapasitans (pF)	244
Sönüm Faktörü	0.018
Eylemsiz Kütle (gram)	0.3

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Hasan Göksenin ÇETİN
Doğum Yeri: Kadıköy
Medeni Hali: Evli
E-Posta: hasangoksenin.cetin@gmail.com
Adresi: Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Beytepe, Ankara 06800

Eğitim

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı, Ankara (2012-2015)
Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Otomotiv Mühendisliği Programı, Ankara (2007-2012)
Lise: Nermin Mehmet Çekiç Anadolu Lisesi, Ankara
(2003-2007)

Yabancı Diller

İngilizce, Almanca

Deneyim Alanları

Enerji hasadı sistemleri, mekanik test sistemleri

İş Deneyimi

ASELSAN A.Ş., Sistem Test Mühendisliği, Ankara (2012-...)

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Cetin, H.G., Sumer, B., A Flexible Piezoelectric Energy Harvesting System for Broadband and Low-frequency Vibrations, *Procedia Engineering Eurosensors 2015*, vol. 120, pp. 345-348, DOI:10.1016/j.proeng.2015.08.631, 2015.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Eurosensors 2015, Oral Presentation, September 6-9, 2015, Freiburg, Germany