



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

**İKİ DURUMLU PİEZOELEKTRİK MALZEMELERDEN
ENERJİ HASADI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun ÖZKURT

DANIŞMAN

Prof. Dr. Tolga TANER

İKİNCİ DANIŞMAN

Doç. Dr. Filiz SARI

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 232358004 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Harun ÖZKURT tarafından hazırlanan “**İKİ DURUMLU PİEZOELEKTRİK MALZEMELERDEN ENERJİ HASADI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Nanoteknoloji Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Tolga TANER

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Emre ARSLAN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 07/11/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Harun ÖZKURT



TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlama sürecinde, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, rehberliği ve sabrı için danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tolga TANER'e ve eş danışman hocam Sayın Doç. Dr. Filiz SARI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Her iki hocam da değerli katkıları ve yönlendirmeleriyle çalışmama önemli ölçüde ışık tutmuşlardır.

Tez çalışmam süresince sevgi, anlayış ve sabırla yanımda olan, bana moral ve motivasyon sağlayan aileme ve yakınlarıma şükranlarımı sunarım. Gösterdikleri destek, bu çalışmayı başarıyla tamamlamamda önemli bir etken olmuştur.

Bu süreçte rehberlik eden, bilgi ve tecrübeleriyle akademik gelişimime katkı sağlayan tüm hocalarıma ve akademik yolculuğum boyunca bana eşlik eden arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez, bana unutulmaz bir öğrenme ve gelişim deneyimi sunmuştur. Emeği geçen herkese en derin minnettarlığımı sunarım.

Harun ÖZKURT

AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGE DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	4
2.1 Piezoelektrik Malzemeler ve Temel İlkeleri	4
2.2 İki Durumlu Piezoelektrik Malzemeler.....	11
2.3 Enerji Hasadı Prensipleri.....	13
2.4 Ana Bileşenler	14
2.4.1 Deney düzeneği ve çalışma prensibi	15
2.4.2 Çalışma prensibi.....	16
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	17
3.1 Optimizasyon Algoritması	17
3.2 Gerilim Zaman ve Yer Değiştirme.....	20
3.3 Güç Değeri	29
3.4 OGY Yöntemiyle Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemlerinde Kaos Kontrolü.	34
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKÇA	42
ÖZGEÇMİŞ.....	48

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİ DURUMLU PIEZOELEKTRİK MALZEMELERDEN ENERJİ HASADI

Harun ÖZKURT

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tolga TANER
İkinci Danışman: Doç. Dr. Filiz SARI

ÖZET

Bu çalışma da iki durumlu piezoelektrik malzemelerden enerji hasadı incelenmiştir. Çalışmada STONEHENGE yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiş, parametre taramaları yapılmış ve Python tabanlı optimizasyon algoritması ile sistem performansı değerlendirilmiştir. Analizlerde başlangıçta uyarım frekansı $\Omega = 0.8$ ve uyarım genliği $f = 0.147$ değerleri kullanılmış, optimizasyon sonucunda ise en uygun değerlerin $\Omega = 1.181129$ ve $f = 0.4734$ olduğu belirlenmiştir. Bu parametreler ile maksimum güç çıkışı 69.052 mW olarak elde edilmiş, doğrusal olmayan bağlanım katsayısının (β) enerji verimini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ayrıca, OGY yöntemi ile sistem kaotik rejimden çıkarılarak kararlı periyodik rejime geçirilmiş ve enerji üretiminin öngörülebilirliği artırılmıştır. Sonuç olarak iki durumlu piezoelektrik sistemlerin enerji hasadı uygulamaları için yüksek potansiyel sunduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik Enerji Hasadı, İki Durumlu Sistem, Optimizasyon, STONEHENGE, OGY Yöntemi, Kaos Kontrolü, Doğrusal Olmayan Sistemler, PZT.

Kasım, 2025; 48 sayfa

M.Sc. THESIS

**ENERGY HARVESTING FROM BISTABLE PIEZOELEKTRIC
MATERIALS**

Harun ÖZKURT

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanotechnology**

**Supervisor: Prof. Dr. Tolga TANER
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Filiz SARI**

ABSTRACT

In this study, energy harvesting from bistable piezoelectric materials was investigated. Numerical simulations were carried out using the STONEHENGE software, parameter scans were performed, and a Python-based optimization algorithm was employed to evaluate system performance. Initially, the excitation frequency was set to $\Omega = 0.8$ and the excitation amplitude to $f = 0.147$, while optimization results revealed that the optimal values were $\Omega = 1.181129$, and $f = 0.4734$. Under these parameters, the maximum power output was obtained as 69.052 mW, and it was observed that the nonlinear coupling coefficient (β) significantly affected the energy efficiency. In addition, the OGY method was applied to drive the system from a chaotic regime into a stable periodic regime, thereby increasing the predictability of energy generation. As a result, bistable piezoelectric systems have been demonstrated to offer high potential for energy harvesting applications.

Keywords: Piezoelectric Energy Harvesting, Bistable System, Optimization, STONEHENGE, OGY Method, Chaos Control, Nonlinear Systems, PZT.

November, 2025; 48 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	STONEHENGE paketi modüllerinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.2.	(a) simetrik toplayıcı, (b) $\phi = 35^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı, (c) $\phi_{opt} = -4.95^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı.....	8
Şekil 2.3.	(a) simetrik toplayıcı, (b) $\phi = 35^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı, (c) $\phi_{opt} = -4.95^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı.....	10
Şekil 2.4.	İki durumlu enerji toplayıcının (IDT) şematik görüntüsü	15
Şekil 3.1.	En iyi değer bulma algoritması.....	18
Şekil 3.2.	(a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta=0$ $f=0.147$ $\omega=0.8$, (b) gerilim zaman çıkışı.....	21
Şekil 3.3.	(a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta=0.5$ $f=0.147$ $\omega=0.8$, (b) gerilim zaman çıkışı.....	23
Şekil 3.4.	(a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta = 0$ $f=0.4734$ $\omega = 1.181129$, (b) gerilim zaman çıkışı.....	25
Şekil 3.5.	(a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta = 0.5$ $f=0.4734$ $\omega = 1.181129$, (b) gerilim zaman çıkışı.	27
Şekil 3.6.	Güç Değerleri (a) $\beta=0.5$ $f=0.147$ $\omega=0.8$ (b) $\beta = 0.5$ $f=0.4734$ $\omega = 1.181129$	31
Şekil 3.7.	(a) $\beta=0.5$ için güç çıkışı (b) $\beta=0$ için güç çıkışı.....	32
Şekil 3.8.	Kaos kontrol ($f=0.147$, $\Omega = 0.8$).	35
Şekil 3.9.	Kaos kontrol ($f=0.4734$, $\Omega = 1.181129$).	36
Şekil 3.10.	Kaos kontrol ($f=0.083$, $\Omega = 0.8$).	37

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Piezoelektrik malzemeler.....	11
Çizelge 3.1. En iyi değerler.....	20
Çizelge 3.2. Anlık güç değerleri.	33



SİMGELER VE KISALTMALAR

BaTiO₃	Baryum Titanat
BiFeO₃	Bizmut Ferrit
D	Elektriksel Yer Değiştirme (C/m ²)
d	Kütle
DC	Doğru Akım
DSP	Dijital Sinyal İşlemci
E	Elektrik Alan (V/m)
f	Uyarım Genliği
FeRAM	Ferroelektrik Rastgele Erişimli Bellek
FPGA	Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi
IDT	İki Durumlu Toplayıcı
IoT	Nesnelerin İnterneti
KNbO₃	Potasyum Niyobyum Oksit
LiNbO₃	Lityum Niyobat
mW	Milivat
OGY	Ott-Grebogi-Yorke Kaos Kontrol Yönetimi
P	Anlık Güç
PVDF	Poliviniliden Florür
PZT	Kurşun Zirkonat Titanat
R	Direnç
S	Gerinim
s	Esneklik Katsayısı (m ² /N)
SECE	Synchronous Electric Charge Extraction
SSHI	Synchronized Switch Harvesting on Inductor
STONEHENGE	Suite for Nonlinear of Energy Harvesting Systems
T	Mekanik Gerilim (N/m ²)
V	Gerilim
β	Doğrusal Olmayan Bağlanım Katsayısı
ξ	Sönüm Katsayısı
λ	Elektriksel Sönüm
κ	Histeretik Kayıp
Ω	Uyarım Frekansı
φ	Asimetri Açısı
ε	Dielektrik Sabiti (F/m)
°	Derece

1. GİRİŞ

Enerji verimliliği açısından büyük potansiyel sunan piezoelektrik malzemeler, mekanik enerji ile elektrik enerjisi arasında dönüşüm sağlayabilen özellikleri sayesinde enerji hasadı uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Bu malzemelerin temel çalışma prensibi, belirli bir mekanik stres altında kutuplaşma oluşturarak bir elektrik potansiyeli üretmeleridir. Piezoelektrik etkisi, enerji dönüşümünde yüksek verimlilik sunması ve çevre dostu olması nedeniyle son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu çalışmada, piezoelektrik malzemelerin iki durumlu (bistable) enerji hasadı teknikleri üzerine yoğunlaşmış ve bu bağlamda geliştirilen STONEHENG (Suite for Nonlinear Analysis of Energy Harvesting Systems) kodu kullanılarak elde edilen verim artırılmıştır.

Piezoelektrik enerji hasadı, çevresel mekanik titreşimler, basınç, gerilim ve darbeler gibi fiziksel olaylardan elektrik enerjisi elde etmeyi hedefler. Enerji hasadının uygulama alanları arasında biyomedikal cihazlar, giyilebilir teknolojiler, taşıma sistemleri, yapısal sağlık izleme sistemleri ve otomasyon endüstrisi bulunmaktadır [1-4]. Çalışmanın temel amacı, çevresel titreşimlerden maksimum enerji verimini elde ederek enerji bağımsız sistemler geliştirmektir. Bu tür uygulamalar, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç arttıkça daha fazla önem kazanmaktadır. Geliştirilmiş enerji hasadı sistemleri, hem enerji sürdürülebilirliğine katkıda bulunmakta hem de taşınabilir cihazların çalışma sürelerini uzatarak kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir [5,6].

Piezoelektrik enerji hasadı çalışmaları hem teorik hem de pratik olarak geniş bir literatüre sahiptir. Piezoelektrik malzemelerin nanoteknoloji ile birleştirilerek enerji dönüşüm veriminin artırılabilceği gösterilmiştir [1,7]. Benzer şekilde, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin mikroelektronik cihazlarla entegrasyonuna yönelik yenilikçi yaklaşımlar sunmuşlardır [8]. Bunun yanında, yapılan araştırmalar yeni nesil piezoelektrik malzemelerin enerji hasadı kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymuştur [9]. Bu bağlamda, STONEHENG kodunun sunduğu algoritmik geliştirmeler, mevcut literatüre katkı sağlayarak enerji dönüşüm teknolojilerinin daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Ayrıca piezoelektrik enerji hasadı, sürdürülebilir enerji teknolojileriyle uyumlu bir şekilde gelişmektedir. Çinko oksit nanotel dizileri kullanılarak piezoelektrik nanogeneratörlerin enerji üretimindeki potansiyelini ortaya koymuştur [8]. Bunun yanı sıra piezoelektrik ve akustik malzemelerin transdüktör uygulamalarındaki etkinliğini incelemiş ve bu malzemelerin enerji hasadındaki rolünü vurgulamıştır [10]. Geliştirilen yeni teknikler, sadece enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sistemlerin dayanıklılığını da artırmaktadır.

Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri üzerine yapılan deneysel ve simülasyon tabanlı çalışmalar, bu sistemlerin performansını artırmak ve dinamik davranışlarını anlamak amacıyla çeşitli yazılım araçlarının geliştirilmesine yol açmıştır. Bu bağlamda, STONEHENGE ve enerji hasadı optimizasyonu gibi yazılımlar, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin doğrusal olmayan (non-linear) dinamiklerini modellemek, simüle etmek ve optimize etmek için kullanılmaktadır [11].

STONEHENGE, özellikle iki durumlu piezo-magneto-elastik enerji toplayıcılarının davranışlarını incelemek için geliştirilmiş bir yazılım paketidir [12]. Bu yazılım; Başlangıç değer problemi analizi, dinamik animasyonlar, doğrusal olmayan analiz araçları, duyarlılık analizi, stokastik simülasyonlar ve kaos kontrol yöntemleri gibi modüller içermektedir [13]. Bu modüller, araştırmacıların enerji hasadı sistemlerinin performansını çeşitli fiziksel parametreler ve uyarım koşulları altında detaylı bir şekilde incelemelerine olanak tanır. Ayrıca, STONEHENGE yazılımı, doğrusal olmayan dinamik analizlerde asimetrik iki durumlu enerji toplayıcılarının davranışlarını modellemek için de kullanılmaktadır [13].

Enerji hasadı optimizasyonu, STONEHENGE paketinin bir optimizasyon modülü olarak geliştirilmiştir ve iki durumlu piezo-magneto-elastik enerji toplayıcılarının enerji geri kazanımını maksimize etmek için kullanılmaktadır [14]. Bu araç, çapraz entropi (cross-entropy) yöntemi gibi gelişmiş optimizasyon algoritmalarını kullanarak enerji toplayıcılarının performansını artırmayı hedefler. Bu optimizasyon teknikleri, iki durumlu enerji toplayıcılarının titreşim enerji dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır [15].

Bu yazılımlar, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi için önemli araçlar sunmaktadır. STONEHENGE ve enerji hasadı optimizasyonu araştırmacıların sistemlerin dinamik davranışlarını anlamalarına ve performanslarını

optimize etmelerine yardımcı olmaktadır. Özellikle, kaos kontrolü, doğrusal olmayan optimizasyon ve stokastik analizler gibi gelişmiş yöntemler, piezoelektrik enerji toplayıcılarının verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmada kullanılan STONEHENGE kodu, enerji dönüşümünde optimizasyon sağlayan bir algoritmadır. Kod, iki durumlu enerji hasadı için özel olarak tasarlanmış olup piezoelektrik malzemelerin enerji toplama verimliliğini artırması hedeflenmiştir. Geliştirme sürecinde, kodun algoritmik yapısı optimize edilerek enerji toplama kapasitesi üzerinde önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Özellikle enerji depolama kapasitesinin artışı ve enerji kayıplarının azaltılması, kodun yenilikçi özelliklerinden bazılarıdır. Bunun yanı sıra çalışmada nesnelerin interneti (IoT) haricindeki tüm uygulama alanları hedeflenmiş ve bu bağlamda geliştirilen sistemin çok yönlülüğü ön plana çıkarılmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında piezoelektrik malzemelerden enerji hasadı konusuna odaklanılmış ve geliştirilen yöntemlerle enerji dönüşüm verimliliği artırılmıştır. Çalışmanın enerji bağımsız sistemlerin geliştirilmesine olan katkıları, çevresel sürdürülebilirlik ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Geliştirilen sistem, özellikle IoT dışındaki alanlarda enerji toplama kapasitesini artırmak için uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışma hem teorik hem de uygulamalı olarak önemli bir yenilikçi yaklaşımı temsil etmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Piezoelektrik Malzemeler ve Temel İlkeleri

Piezoelektrik malzemeler, uygulanan mekanik gerilime karşılık elektrik yükü üreten ya da uygulanan elektrik alan ile şekil değiştiren kristal yapıdaki malzemelerdir. Bu özellik ilk olarak Pierre ve Jacques Curie tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir [16]. Piezoelektrik etki, kristal yapılarındaki simetrik olmayan atomik düzenin gerilme altında elektriksel dipol momentlerinin yönlenmesiyle oluşur [17].

Piezoelektrik olay iki yönlü gerçekleşir; doğrudan piezoelektrik etki, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Ters piezoelektrik etki, elektrik alan uygulandığında mekanik deformasyon üretir. Bu çift yönlü özellik, piezoelektrik malzemeleri sensör, aktüatör ve enerji hasadı gibi çeşitli uygulamalarda değerli kılar. Özellikle titreşimlerin, basıncın ya da darbenin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan sistemlerde kullanımı oldukça yaygındır [18].

Bu çalışmada kullanılan kurşun zirkonyum titanat (PZT), en yaygın kullanılan piezoelektrik seramiklerden biridir. PZT, yüksek piezoelektrik katsayıları, düşük dielektrik kayıplar ve mekanik dayanıklılığıyla enerji hasadı uygulamaları için uygundur [19]. Ek olarak katkı elementleriyle yapılandırıldığında doğrusal (lineer) ya da doğrusal olmayan karakteristikler sergileyebilir [10]. Bu çalışmada PZT malzemesinin doğrusal olmayan tepkisi dikkate alınarak daha gerçekçi bir enerji dönüşüm modeli elde edilmiştir.

Piezoelektrik malzemelerin davranışı genellikle doğrusal sistem teorisi kullanılarak modellenir. Doğrusal durumda, piezoelektrik etkiler oluşum Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) ile tanımlanır [20].

$$D = dT + \epsilon E \quad (2.1)$$

$$S = sT + dE \quad (2.2)$$

Burada D elektriksel yer değiştirme (C/m^2), T mekanik gerilim (N/m^2), E elektrik alan (V/m), S gerinim, d piezoelektrik katsayısı (m/V), s esneklik katsayısı (m^2/N) ve ϵ : dielektrik sabitidir (F/m). Ancak yüksek genlikli titreşimlerde ve karmaşık koşullarda doğrusal modeller yeterli değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan modeller geliştirilmiştir.

Doğrusal olmayan piezoelektrik sistemler, özellikle iki durumlu yapılar, daha geniş frekans aralıklarında enerji hasadı sağlayabilir [21]. Çalışmada kullanılan sistem de piezoelektrik yapı Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) ile matematiksel olarak modellenmiştir [15].

$$\ddot{x} + 2\xi\dot{x} - \frac{1}{2}x(1 - x^2v) = f\cos(\Omega t) \quad (2.3)$$

$$\dot{v} + \lambda v + \kappa\dot{v} = 0 \quad (2.4)$$

Bu denklemlerde x mekanik yer değiştirme, v piezo gerilimi, ξ sönüm katsayısı, λ elektriksel sönüm, κ histeretik kayıpları ifade eder. Denklem (2.3) mekanik sistemi ve piezoelektrik etkileşimini, denklem (2.4) ise elektriksel devre davranışını temsil eder.

Simülasyonlarınızda kullanılan STONEHENGE kodu, bu tür doğrusal olmayan sistemlerin sayısal çözümleri için geliştirilmiş bir araç olup zamanla değişen dinamiklerin analizinde önemli avantajlar sunar [22]. Özellikle enerji hasadı sırasında sistemin rezonans dışı bölgelerde bile verimli çalışmasını sağlar. Bu tür modellemeler, sadece ortalama enerji üretimini değil, sistemin kararlılığını ve tepki süresini de analiz etmeye olanak tanır [23].

Piezoelektrik enerji hasadı, özellikle taşınabilir cihazlar, kablosuz sensör ağları ve yapısal sağlık izleme sistemleri için umut verici bir alternatiftir [24]. PZT gibi seramik malzemelerle geliştirilen doğrusal olmayan iki durumlu sistemler, titreşim tabanlı düşük güçlü sistemlerde enerji ihtiyacını karşılamak üzere geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir [25]. Gelişmiş doğrusal olmayan modelleme yaklaşımları, enerji dönüşüm verimliliğini artırmakta ve geleneksel doğrusal sistemlerin ötesinde çözümler sunmaktadır [26].

Piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinde yüksek verimli enerji dönüşümü elde etmek amacıyla doğrusal olmayan sistem yapılarına yönelinmiştir. Bu bağlamda özellikle iki durumlu sistemler dikkat çekmektedir. Bu sistemler genellikle iki minimum noktası bulunan bir potansiyel enerji fonksiyonu ile modellenir. Potansiyel enerji fonksiyonu $U(x)$ genel olarak Denklem (2.5) ile tanımlanır [27].

$$U(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 \quad (2.5)$$

Burada x , mekanik sistemin yer değiştirmesini temsil ederken; $a > 0$ ve $b > 0$ parametreleri, sistemin yapısal özelliklerine bağlı sabitlerdir. Bu ifade sistemin iki durumlu potansiyel yapısını tanımlamakta olup Chen ve arkadaşları [27] tarafından sunulan modeldeki değişken potansiyel çukur yaklaşımının matematiksel olarak sadeleştirilmiş biçimi olarak değerlendirilebilir. Bu fonksiyonun iki minimum noktası $x = \pm\sqrt{a/b}$ konumlarında bulunur ve bu noktalar sistemin kararlı denge konumlarını temsil eder.

Bu noktalar, sistemin kararlı denge konumlarını belirler ve aralarında bir potansiyel bariyer bulunur. Bu yapı, sistemin enerji seviyesine bağlı olarak bir durumdan diğerine geçiş yapmasına, dolayısıyla geniş genlikli salınımlar oluşturmasına olanak tanır. Bu tür salınımlar, klasik tek durumlu (monostable) sistemlere göre daha fazla enerji hasadı sağlar [25].

İki durumlu potansiyel yapı, piezo-mekanik sistemin manyetik veya elastik kuvvetlerle iki kararlı denge konumuna zorlandığı durumlarda oluşur. Bu tür modeller, çoğunlukla magneto-elastik kiriş sistemlerinde kullanılır ve piezoelektrik dönüştürücü ile entegre edilerek elektriksel enerji üretimi sağlanır. Bu tür iki durumlu sistemler, özellikle magneto-elastik piezoelektrik enerji hasadı yapılarında detaylı biçimde incelenmiş ve geniş bantlı enerji toplama potansiyelleri ortaya konmuştur [28]. Sistemin dinamik davranışı, sönüm (ξ), harici periyodik uyarım ($f\cos(\Omega t)$) ve piezoelektrik kuplaj (enerji çukuru) (χ, κ) gibi parametreleri içeren diferansiyel denklem sistemi Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) ile tanımlanabilir [15].

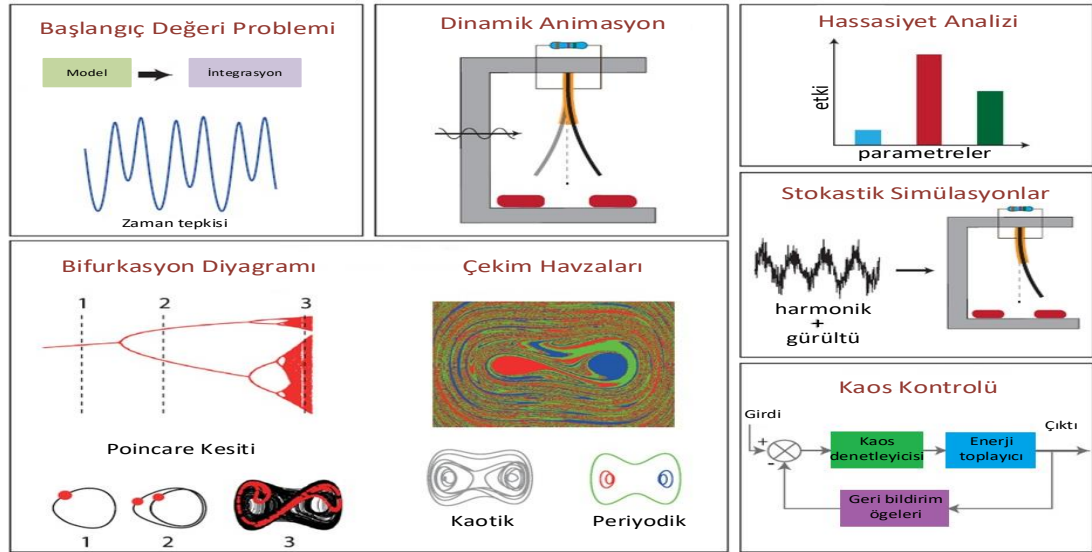
$$\ddot{x} + 2\xi\dot{x} - ax + bx^3 + xv = f\cos(\Omega t) \quad (2.6)$$

$$\dot{v} + \lambda v = -\kappa\dot{x} \quad (2.7)$$

Bu denklem seti, piezoelektrik enerji dönüşüm sürecini ve sistemin zamana bağlı evrimini temsil eder. Özellikle kaotik veya geniş genlikli periyodik salınımların gözlenmesi için iki durumlu potansiyel kuyular arasında gerçekleşen geçişlerin kontrolü kritik öneme sahiptir. Bu amaçla bazı çalışmalarda kaos kontrol teknikleri, OGY (Ott–Grebogi–Yorke) algoritması uygulanmaktadır [29].

şekil 2.1'de STONEHENGE yazılım paketinin modüler yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu paket, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin dinamik analizini,

doğrusal olmayan davranışlarını, hassasiyet analizlerini ve kaos kontrolünü incelemek amacıyla geliştirilmiştir [29].



Şekil 2.1. STONEHENGGE paketi modüllerinin şematik gösterimi [29].

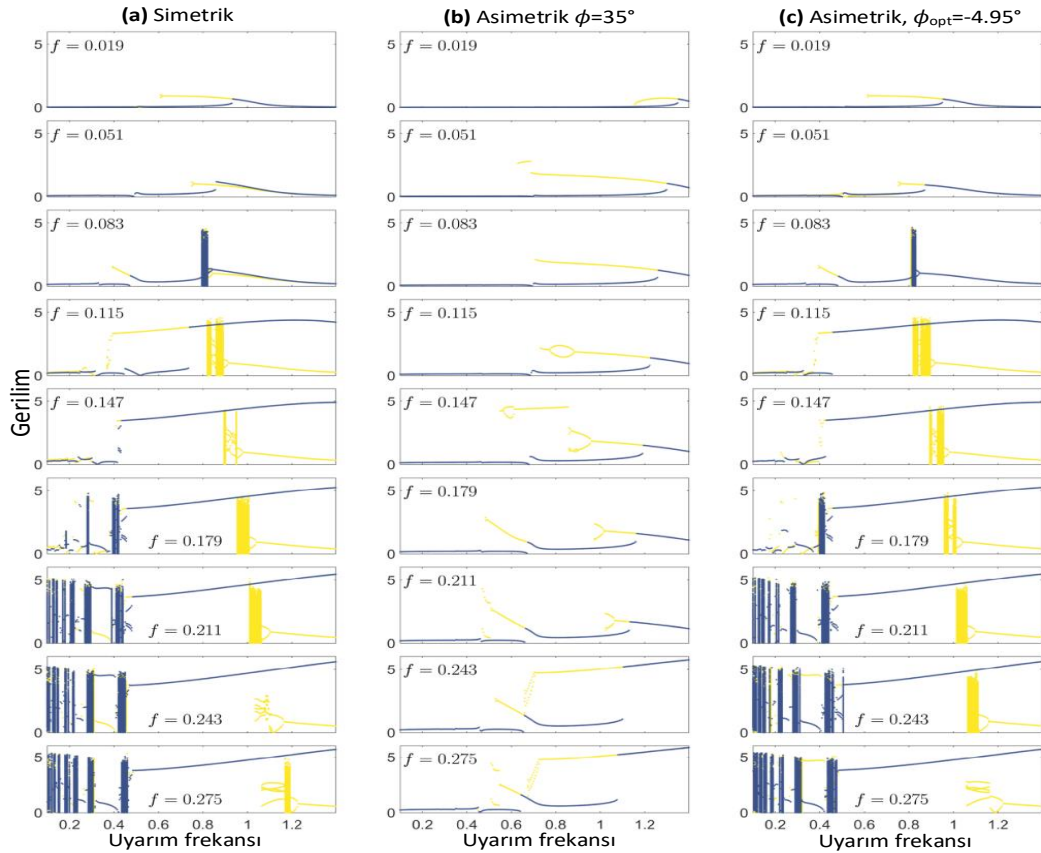
Piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin doğrusal olmayan dinamiklerini anlamak ve optimize etmek için çeşitli matematiksel ve sayısal analiz teknikleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin analizinde yalnızca zamana bağlı yanıtlar değil, aynı zamanda sistemin topolojik ve faz uzayı davranışları da önemlidir.

Başlangıç değeri problemi, doğrusal olmayan sistemlerin zamanla nasıl evrildiğini görmek için diferansiyel denklemlerin sayısal entegrasyonu ile çözülür. Bu yaklaşım, sistemin belirli başlangıç koşulları altındaki zaman-tepki (time-response) davranışını analiz eder [30]. Dinamik animasyon, özellikle piezoelektrik giriş sistemleri gibi fiziksel modellerde, titreşimin görsel simülasyonunu sunarak sezgisel analiz yapılmasını sağlar. Bu tür görselleştirme teknikleri, eğitim ve tasarım aşamalarında önemli avantajlar sunar. Hassasiyet analizi, sistem parametrelerinin sistem cevabı üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Parametre varyasyonları ile sistem performansı arasındaki ilişki, özellikle çok parametrelili modellerde tasarım iyileştirmesi için kullanılır [31].

Stokastik simülasyonlar, sistemin harmonik giriş ek olarak çevresel gürültü gibi rassal etkiler altında nasıl davrandığını analiz eder. Gürültü ile uyumlu titreşim üretimi (stochastic resonance) gibi olgular bu bağlamda incelenir [32]. Bifurkasyon diyagramı,

sistem parametrelerinden birinin değişimiyle sistemin kararlı ve kaotik çözümleri arasında nasıl geçiş yaptığını gösterir. Bu yöntem, kaosa geçişin erken belirlenmesinde kullanılır [33]. Poincaré kesiti, periyodik sistemlerde belirli zaman aralıklarında alınan örneklerle sistemin faz düzlemindeki yapısını ortaya koyar. Kaotik ve periyodik davranışları ayırmakta kullanılır [34]. Çekim havzaları, farklı başlangıç koşullarının hangi kararlı çözüme yakınsadığını göstererek sistemin çoklu kararlılığını ortaya çıkarır. Özellikle iki durumlu sistemlerde potansiyel kuyular arasındaki geçiş analizleri bu yöntemle gerçekleştirilir [35]. Kaos kontrolü, kaotik sistemlerde istenmeyen karmaşık davranışları bastırmak ya da yönlendirmek için geri besleme yöntemlerinin uygulanmasıdır. Enerji hasadı sistemlerinde maksimum çıktı elde etmek için OGY algoritması gibi teknikler sıklıkla tercih edilmektedir [36].

Şekil 2.2’de iki durumlu piezoelektrik enerji toplayıcı sistemlerin farklı sabit uyarım genliği (f) değerleri altında gerçekleştirilen frekans taramalarına verdikleri çıkış gerilimleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. (a) simetrik toplayıcı, (b) $\phi = 35^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı, (c) $\phi_{opt} = -4.95^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı [37].

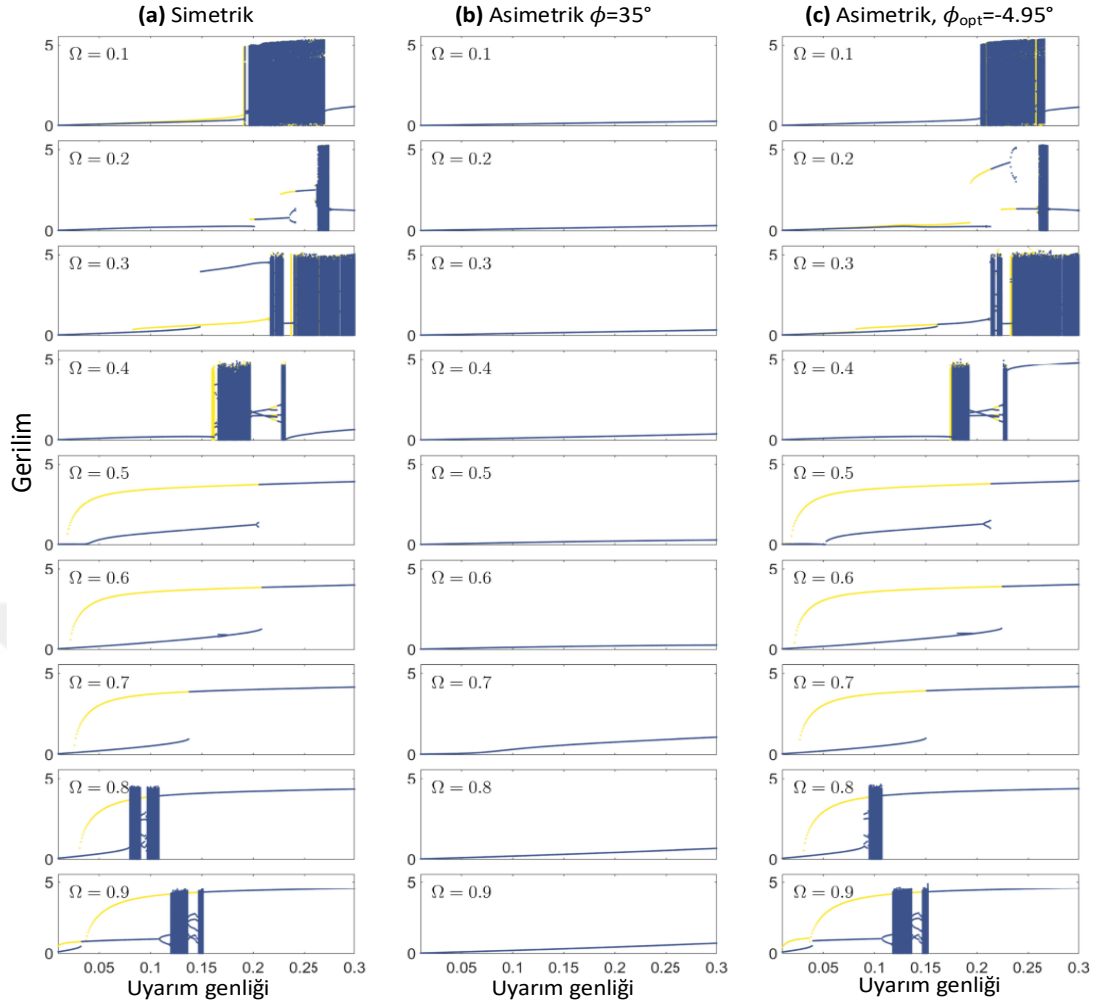
Şekil 2.2’de her satırda belirli bir f sabitken, uyarım frekansı artırılarak (mavi) ve azaltılarak (sarı) tarama yapılmış, böylece sistemin histerezis davranışı ve çoklu kararlılık bölgeleri gözlemlenmiştir.

Simetrik sistem, düşük frekanslarda kararlı davranış sergilese de $f \geq 0.115$ sonrası belirgin kaotik geçiş bölgelerine girmektedir. Bu bölgelerde çok sayıda denge noktası ve geniş histerezis döngüleri oluşmaktadır. Özellikle $f=0.147-0.2430$ aralığında frekansa duyarlı, yüksek genlikli ve kararsız gerilim tepkileri izlenmektedir. Bu durum, enerji çıkışında düzensizliklere ve verim kaybına neden olabilmektedir.

$\phi = 35^\circ$ asimetrik durumda, sistem daha öngörülebilir bir hal almış, kaotik bölgeler büyük ölçüde bastırılmıştır. Ancak bu yapı, çıkış geriliminde keskin artışlar üretmediği için enerji verimi açısından sınırlı kalmaktadır. Potansiyel kuyular arasındaki asimetri, sistemin yalnızca bir kararlı denge noktasına yönelmesine neden olmuştur.

Optimum asimetri ($\phi_{opt} = -4.95^\circ$) uygulandığında, sistem hem yüksek gerilimli hem de daha kararlı salınımlar üretmiştir. Bu yapı, $f=0.147-0.2430$ aralığında geniş bantlı ve stabil enerji üretimi sağlamıştır. Ayrıca, histerezis etkisi en aza indirilmiş, ileri ve geri taramalar birbirine daha yakın hale gelmiştir. Bu durum, enerji toplayıcı sistemin sadece kararlılık değil, aynı zamanda enerji yoğunluğu açısından da optimize edildiğini göstermektedir.

Genel olarak bu analiz, iki durumlu sistemlerde yapısal asimetri tasarımının dinamik davranış ve enerji hasadı performansını üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2.3. (a) simetrik toplayıcı, (b) $\phi = 35^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı, (c) $\phi_{opt} = -4.95^\circ$ 'lik asimetrik toplayıcı [37].

Şekil 2.3'de, iki durumlu piezoelektrik enerji toplayıcıların farklı asimetrik açılarla elde edilen denge çözümleri gösterilmektedir. İki durumlu piezoelektrik enerji toplayıcıların çıkış gerilimine ait denge çözümleri, sabit frekans (Ω) değerlerinde uyarım genliği artırılarak elde edilmiştir. Mavi eğriler ileri taramayı, sarı eğriler geri taramayı temsil etmektedir.

Simetrik yapı, düşük frekans ($\Omega \leq 0.4$) değerlerinde geniş genlikli kaotik geçiş bölgeleri ve belirgin histerezis etkileri göstermektedir. Çoklu kararlı denge noktalarının olduğu bu aralıklarda sistemin başlangıç koşullarına duyarlılığı artmakta, yüksek çıkış gerilimi elde edilse de enerji verimi kararsız hale gelmektedir. Özellikle $\Omega=0.3$ ve $\Omega=0.8$ değerlerinde kaotik salınımlar net şekilde izlenmektedir.

$\phi = 35^\circ$ açıyla oluşturulan asimetrik yapı, potansiyel kuyular arasındaki dengeyi bozarak sistemi tek kararlı dengeye zorlamakta, bu da kaotik bölgelerin ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Ancak sistemin çıkış gerilimi büyük ölçüde düşmekte ve enerji hasadı sınırlı kalmaktadır.

Optimum asimetrik açı ($\phi_{opt} = -4.95^\circ$) durumunda ise sistem, hem çift kararlılığı koruyarak yüksek çıkış gerilimlerine ulaşmakta hem de belirli frekans aralıklarında (örneğin $\Omega=0.4, 0.8$) kaotik davranışı sınırlayarak daha kararlı cevaplar vermektedir. Ayrıca histerezis etkisi, simetrik yapıya göre daha azdır. Şekil 2.3 sistemin dinamik cevabının yalnızca frekansa değil, genlik artışı sırasında oluşan geçici rejimlere de duyarlı olduğunu, dolayısıyla yapısal asimetriyle birlikte genlik taramasının sistem verimi üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir.

2.2 İki Durumlu Piezoelektrik Malzemeler

İki durumlu piezoelektrik malzemelerin enerji hasadı uygulamalarında sunduğu çift kararlı yapı, mekanik titreşimlerden maksimum elektriksel çıktı elde edilmesini sağlamaktadır. Çizelge 2.1’de iki durumlu piezoelektrik malzemelerin temel özelliklerini, kristal yapıları ile detaylandırmakta ve bu malzemelerin farklı uygulama alanlarındaki kullanım potansiyelini özetlemektedir. Ferroelektrik özellik gösteren piezoelektrik malzemelerin polarizasyon yönlerini tersine çevirebilme kabiliyetleri, özellikle hafıza, sensör, aktüatör ve optoelektronik cihazlarda geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Ayrıca çevresel kaygılar doğrultusunda geliştirilen kurşunsuz piezoelektrik malzemelerin avantajlarına da değinilmektedir.

Çizelge 2. 1. Piezoelektrik malzemeler.

Malzeme Adı	Yapı Grubu	Kullanım Alanları
PZT ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$)	Perovskit	Aktüatör, sensör, hafıza
BaTiO_3 (Baryum Titanat)	Perovskit	DRAM, sensör
BiFeO_3 (Bizmut Ferrit)	Perovskit	Spintronik, çoklu ferroik
KNbO_3 (Potasyum Niyobyum Oksit)	Perovskit	Optoelektronik
LiNbO_3 (Lityum Niyobat)	Trigonal (rombohedral)	Optik modülatör, SAW cihazı
PVDF (Poliviniliden Florür)	Polimer (yarı-kristal)	Esnek sensörler, giyilebilir cihazlar

İki durumlu piezoelektrik malzemeler, dış elektrik alan uygulandığında polarizasyon yönlerini tersine çevirebilen ve bu sayede iki kararlı elektriksel durumu temsil edebilen ferroelektrik özellikli piezoelektrik malzemelerdir. Bu yapı, onları özellikle ferroelektrik rastgele erişimli bellek (FeRAM) gibi hafıza uygulamaları için uygun hale getirir. En yaygın kullanılan malzemelerden biri olan PZT, yüksek piezoelektrik katsayısı ve kolay kutuplaştırılabilir yapısı sayesinde sensör, aktüatör ve ultrasonik cihazlarda sıklıkla tercih edilmektedir [38]. Benzer şekilde, baryum titanat (BaTiO_3), ilk keşfedilen seramik ferroelektriklerdendir ve günümüzde hala temel araştırmalar için referans malzeme olarak kullanılmaktadır [39].

Bu tür malzemelerin çoğu perovskit kristal yapısına sahiptir ve ferroelektrik özellikleri sıcaklık, stres ve elektrik alan gibi dış etkenlere bağlı olarak değiştirilebilir. LiNbO_3 (lityum niyobat) gibi kristal yapılu piezoelektrikler, yüksek elektro-optik ve piezoelektrik katsayıları sayesinde özellikle telekomünikasyon ve optoelektronik uygulamalarda ön plana çıkmaktadır [40]. Kurşunsuz alternatif arayışları ise çevresel düzenlemeler nedeniyle önem kazanmıştır. Potasyum niyobyum oksit (KNbO_3) ve polimer bazlı PVDF gibi malzemeler, toksik olmayan yapıları ve esneklik avantajları sayesinde biyomedikal ve giyilebilir elektroniklerde kullanılmaya başlanmıştır [41]. Ayrıca BiFeO_3 gibi çoklu ferroik malzemeler, aynı anda hem elektriksel hem de manyetik alanlara tepki verebildiğinden, spintronik ve sensör teknolojilerinde geleceğin aday malzemeleri arasında yer almaktadır [42].

İki durumlu piezoelektrik malzemeler, yalnızca enerji dönüşüm elemanları değil, aynı zamanda veri depolama, algılama ve çevreyle etkileşimli sistemler gibi akıllı uygulamalarda da kilit rol oynamaktadır. Polarizasyonun geri dönüşümlü ve kararlı bir şekilde kontrol edilebilmesi, bu malzemeleri programlanabilir elektronik sistemler için vazgeçilmez hale getirmektedir. Geliştirilen yeni nesil malzemeler, özellikle nano ölçekteki cihazlar ve MEMS/NEMS sistemleri ile entegre edilebilme potansiyeli sunarak, malzeme bilimi ile elektronik mühendisliğini buluşturan yenilikçi çözümler üretmektedir [10]. Bu bağlamda iki durumlu piezoelektrik malzemeler, sadece mevcut teknolojileri geliştirmekle kalmayıp gelecekteki bilgi işlem ve enerji sistemlerinin temel yapı taşlarını oluşturacaktır.

2.3 Enerji Hasadı Prensipleri

Enerji hasadı, çevrede mevcut olan dağınık enerji formlarının (titreşim, ısı, ışık, radyo dalgası vb.) kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemidir [43]. Özellikle pil değişiminin zor ya da imkânsız olduğu gömülü sistemlerde, kablosuz sensör ağlarında ve biyomedikal uygulamalarda enerji hasadı sistemleri sürdürülebilir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır [44]. Bu bağlamda piezoelektrik malzemeler, özellikle mekanik titreşim kaynaklı enerji hasadı uygulamalarında yüksek potansiyele sahiptir [45].

Piezoelektrik enerji hasadında temel prensip, çevredeki periyodik veya stokastik titreşimlerin, piezoelektrik malzeme aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Bir mekanik titreşim, malzeme üzerinde periyodik bir gerinim oluşturur. Bu gerinim, piezoelektrik malzemede yük ayrışmasına neden olur ve malzemenin uçlarında bir gerilim oluşur [25]. Elde edilen bu alternatif akım tipi gerilim, doğrultucular ve enerji yönetim devreleriyle kullanılabilir DC (Doğru Akım) gerilime dönüştürülür [46].

Enerji hasadı sistemlerinin performansı, sistemin rezonans frekansı, sönüm oranı, elektriksel yükleme ve çıkış empedansı gibi parametrelere bağlıdır [47]. Doğrusal sistemler de maksimum enerji dönüşümü sadece rezonans frekansına yakın titreşimlerde gerçekleşirken; doğrusal olmayan sistemlerde geniş bir frekans bandı boyunca enerji elde edilebilir [22]. Bu çalışmada kullanılan iki durumlu sistem, rezonans dışı bölgelerde de enerji dönüşümünü mümkün kılarak bu sınırlamayı aşmayı hedeflemektedir [21].

İki durumlu sistemlerde çift kararlı potansiyel enerji çukuru kullanılır. Bu yapı, sistemin düşük enerjili durumda sıkışıp kalmasını engeller ve dış uyarı kuvveti yeterli olduğunda potansiyel enerji çukurları arasında geçişler sağlar. Bu geçişler sırasında ani ivmelenmeler meydana gelir ve piezoelektrik gerinim artar [48]. Denklemler (2.6) ve (2.7) ile tanımlanan sistemde, bu doğrusal olmayan etki açıkça modellenmiştir. Bu yapı sayesinde, düşük frekanslı ve düzensiz titreşim kaynaklarında bile yüksek enerji dönüşümü sağlanabilir.

Enerji hasadında kullanılan devre yapıları da büyük önem taşır. Direnç yüküyle çalışan basit devrelerin yerine, maksimum güç aktarımı sağlayan adaptif yük devreleri tercih edilir. Örneğin, Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI) ve Synchronous Electric Charge Extraction (SECE) gibi tekniklerle enerji verimliliği artırılabilir [49].

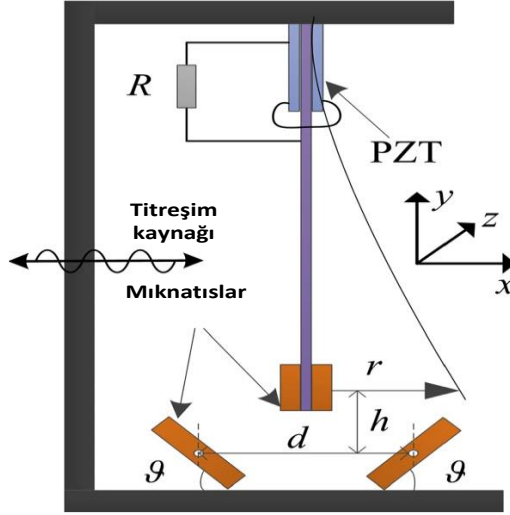
Ayrıca, hasat edilen enerjinin depolanması için süperkapasitörler ve düşük sızıntılı mikro bataryalar kullanılmaktadır [50].

Piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin gerçek ortam koşullarında stabil çalışabilmesi için titreşim kaynaklarının karakterizasyonu önemlidir. Titreşim kaynaklarının çoğu rastgele (stokastik) ve geniş frekans bandına yayılmıştır [51]. Bu nedenle doğrusal olmayan modellemeler ve optimizasyon algoritmalarıyla sistem parametrelerinin adaptif şekilde ayarlanması gerekir [52]. STONEHENGE gibi simülasyon araçları, bu kompleks sistemlerin zaman domenindeki tepkilerini doğru bir şekilde modelleyerek tasarım sürecini optimize eder [23].

Sonuç olarak, piezoelektrik enerji hasadı, taşınabilir ve enerji kısıtlı sistemlerde sürdürülebilir güç kaynağı olarak önemli bir rol oynamaktadır. Doğrusal olmayan iki durumlu yapılar ve gelişmiş enerji yönetim devreleriyle birlikte, klasik enerji kaynaklarının yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Bu çalışma, PZT tabanlı doğrusal olmayan bir yapının modellenmesiyle bu alandaki uygulama çeşitliliğine katkı sağlamaktadır.

2.4 Ana Bileşenler

Piezoelektrik enerji hasadı, çevresel titreşimlerden mekanik enerjiyi toplayarak elektrik enerjisine dönüştüren bir yöntemdir. Bu yöntemde, piezoelektrik malzemelerin mekanik gerilme altında yüzeylerinde elektrik yükü üretme özelliği kullanılır. Geleneksel piezoelektrik enerji hasat sistemleri genellikle dar bantlı çalışırken doğrusal olmayan sistemler daha geniş bir frekans aralığında enerji toplayabilmektedir. Manyetik destekli doğrusal olmayan sistemler, piezoelektrik malzemenin uç kısmına etki eden manyetik kuvvetler aracılığıyla titreşim genliğini ve sistemin dinamik tepkisini değiştirerek verimi artırmaktadır [53]. Şekil 2.4'te, iki durumlu enerji toplayıcının (IDT) şematik yapısı gösterilmektedir. Bu yapı, piezoelektrik malzeme, manyetik destek elemanları ve enerji toplama devresinden oluşmakta olup doğrusal olmayan dinamikler aracılığıyla geniş bantlı enerji hasadı sağlamaktadır [54].



Şekil 2.4. İki durumlu enerji toplayıcının (IDT) şematik görüntüsü [54].

Bu bölüm de manyetik destekli doğrusal olmayan bir piezoelektrik enerji hasat sisteminin bileşenleri ve çalışma prensibi detaylı olarak açıklanacaktır. Şekil 2.4'te gösterilen deney düzeneği, piezoelektrik malzeme, manyetik elemanlar ve elektrik devresinin nasıl konumlandırıldığını içermektedir.

2.4.1 Deney düzeneği ve çalışma prensibi

Piezoelektrik enerji hasadı bir titreşim kaynağı, piezoelektrik malzeme, manyetik elemanlar ve bir elektrik devresinden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan titreşim kaynağı (shaker), piezoelektrik malzemeye mekanik titreşim uygulayarak sistemin çalışmasını başlatır. Shaker, belirli bir frekansta veya rastgele frekans aralıklarında titreşim oluşturabilir. Bu sayede sistemin rezonans özellikleri ve enerji dönüşüm kapasitesi analiz edilebilir [55].

Sistemde dikey olarak gösterilen piezoelektrik malzeme (PZT), mekanik gerilmeye maruz kaldığında elektrik yükü üretmektedir. Piezoelektrik malzemenin üst kısmına bağlı olan elektrik devresi, üretilen elektrik enerjisinin bir direnç üzerinden harcanmasını veya depolanmasını sağlar. Direnç (R), sistemin elektriksel yükünü belirleyerek enerji dönüşüm sürecinde önemli bir rol oynar. Piezoelektrik malzemenin mekanik gerilimi, frekansa ve dışsal kuvvetlere bağlı olarak değişmekte olup sistemin doğal frekansı ile uyumlu çalışması durumunda maksimum enerji hasadı sağlanabilmektedir [56].

Piezoelektrik malzemenin alt ucuna bağlanan kütle (d), sistemin mekanik dinamiklerini etkileyerek salınım frekansını düşürür ve atalet etkisini artırır. Böylece

daha düşük frekanslı çevresel titreşimlerde bile etkin enerji hasadı gerçekleştirilebilir. Şekilde gösterilen h ve r parametreleri, sistemin hareket sınırlarını ve manyetik kuvvetlerin etkisini belirlemektedir. Daha büyük bir kütle, sistemin doğal frekansını düşürerek rezonansın daha geniş bir bantta gerçekleşmesini sağlayabilir [57].

Sistemin alt kısımda görülen iki eğimli mıknatıs, piezoelektrik malzemenin uç kısmına manyetik kuvvetler uygulayarak doğrusal olmayan bir kuvvet alanı oluşturmaktadır. Bu manyetik kuvvetler, sistemin frekans yanıtını genişletmekte ve salınım genliğini artırarak enerji dönüşümünü iyileştirmektedir. Manyetik kuvvetlerin etkisiyle sistem çift kararlı veya kaotik davranışlar gösterebilir, bu da enerji hasadının geniş bir frekans aralığında gerçekleşmesine olanak tanır [58].

2.4.2 Çalışma prensibi

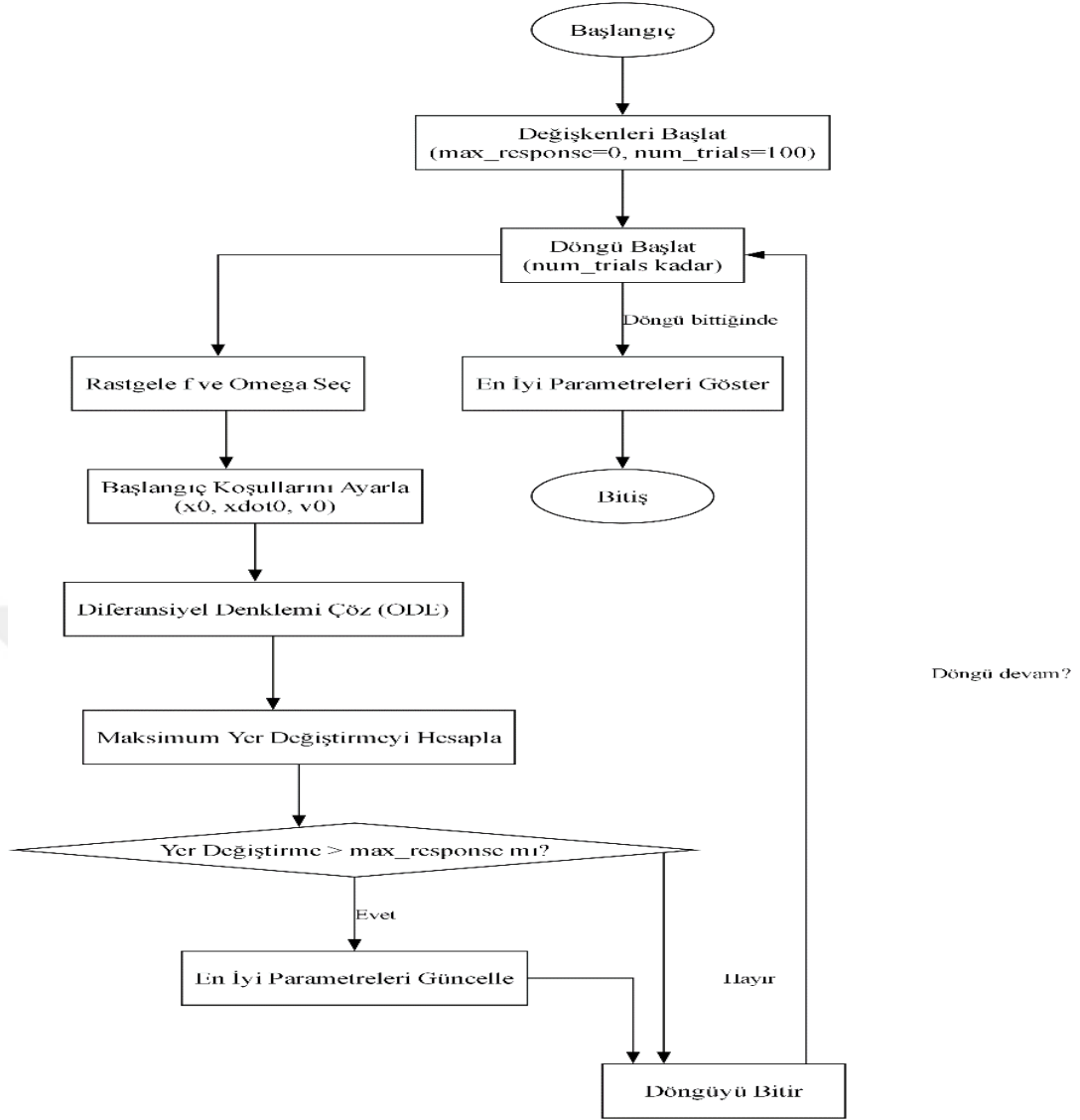
Sistemde alt kısımda görülen harici bir titreşim kaynağı tarafından mekanik olarak uyarıldığında aşağıdaki adımlarla çalışmaktadır.

Titreşim kaynağı (shaker), piezoelektrik malzemeye periyodik mekanik titreşimler uygular. Piezoelektrik malzeme, mekanik zorlanma altında elektrik yükü üretir ve bu yük, bağlı elektrik devresi üzerinden bir dış yük (R) üzerinde harcanır. Manyetik elemanlar, piezoelektrik malzemenin hareketini sınırlandırarak veya artırarak doğrusal olmayan kuvvet etkileri oluşturur. Sistem rezonans frekansına ulaştığında, piezoelektrik malzeme maksimum elektrik enerjisi üretir ve bu enerji bir batarya veya süper kapasitör gibi enerji depolama elemanlarına yönlendirilebilir. Manyetik destekli piezoelektrik enerji hasat sistemleri, geleneksel doğrusal sistemlere kıyasla daha yüksek enerji verimi sunmakta ve geniş bantlı enerji toplama kapasitesi nedeniyle düşük güçlü kablosuz sensör ağları, giyilebilir elektronik cihazlar ve akıllı sistemler gibi çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir [56].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1 Optimizasyon Algoritması

Bu çalışmada, geliştirilen modelin doğruluğunu ve enerji hasadı performansını artırmak amacıyla optimizasyon temelli bir algoritma oluşturulmuştur. Bu algoritma, piezoelektrik-magneto-elastik (örneğin PZT) sistemin dinamik denklemlerini çözerek sistemin maksimum yer değiştirme değerine ulaşmasını sağlayan en uygun parametreleri belirlemeyi hedeflemektedir. Akış diyagramında gösterildiği üzere algoritma, belirli sayıda deneme (iterasyon) boyunca rastgele seçilen uyarma genliği (f) ve frekans (Ω) değerlerini kullanarak diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözmekte, elde edilen tepkileri karşılaştırarak en yüksek yer değiştirmeye sahip parametreleri kaydetmektedir. Böylece, sistemin enerji hasadı kapasitesini maksimize eden en iyi parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, PZT tabanlı enerji hasadı sistemlerinde en iyi değer bulma algoritması Python programı kullanılarak geliştirilen teknik yaklaşım bir olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3.1’de piezoelektrik tabanlı mekanik sistemin dinamik tepkisini analiz etmek amacıyla geliştirilen en iyi değer bulma algoritmasının akış şemasını göstermektedir. Bu akış şeması, farklı parametre kombinasyonlarının sistem üzerindeki etkisini değerlendiren simülasyon sürecini adım adım özetlemektedir. Özellikle, maksimum yer değiştirme değerine ulaşan parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiş olup, algoritmanın bu yapısı parametre uzayında en verimli noktaların keşfedilmesine olanak tanımaktadır. Böylece piezoelektrik enerji hasadı süreçlerinde optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.1. En iyi değer bulma algoritması.

Piezoelektrik tabanlı bir mekanik sistemin dinamik tepkisini analiz etmek amacıyla Python programlama dili kullanılarak bu tez çalışması için özgün bir simülasyon kodu geliştirilmiştir. Simülasyon süreci, Şekil 3.1’de sunulan algoritma akış şemasında özetlenmiştir. Bu algorithmada, sistem parametreleri types modülündeki SimpleNamespace sınıfı ile tanımlanmış ve böylece parametrelerin okunabilirliği ve yönetilebilirliği artırılmıştır. Diferansiyel denklem çözümleri için ise scipy.integrate kütüphanesindeki odeint fonksiyonu tercih edilmiştir.

Modelde üç adet durum değişkeni tanımlanmıştır: Mekanik yer değiştirme (y_1), hız (y_2) ve piezoelektrik malzeme üzerindeki elektriksel gerilimi temsil eden gerilim (y_3). Bu değişkenlerin zamana bağlı türevleri, sistemin fiziksel parametrelerine göre oluşturulmuş diferansiyel denklemler aracılığıyla hesaplanmaktadır. Özellikle dy_2/dt

ifadesi, dış uyarımın piezoelektrik sistem üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Harici kuvvetin frekansı (Ω) ve genliği (f), sistemin zamana bağlı olarak periyodik biçimde uyarılmasını sağlamaktadır.

Kodun temel hedefi, farklı parametre kombinasyonlarının sistemin mekanik tepkisi üzerindeki etkisini incelemektir. Bu amaçla, önceden belirlenen $\text{num_trials} = 80$ sayıda simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her bir denemede, dış kuvvetin frekansı ve genliği belirli aralıklar dahilinde rastgele seçilmiştir. Bu yaklaşım, Monte Carlo benzeri bir tarama yöntemiyle sistemin parametre uzayında maksimum tepkiyi verecek konumları belirlemeyi amaçlamaktadır [59]. Bu yönüyle yöntem, klasik deterministik optimizasyon tekniklerinin ötesine geçerek küresel maksimum noktaların keşfine olanak tanımaktadır.

Her simülasyonun başlangıç koşulları sıfır olarak tanımlanmıştır (sistem başta hareketsiz ve gerilimsizdir). Zaman aralığı 0 ile 50000 arasında 50000 eşit nokta ile belirlenmiş olup, bu sayede yüksek zaman çözünürlüğü elde edilmiştir. Özellikle düşük sönüm oranlarında (örneğin $\xi = 0.01$), geçici durumdan kararlı duruma geçişin gözlemlenebilmesi açısından bu uzun zaman aralığı büyük önem taşımaktadır.

Her döngü sonunda yalnızca yer değiştirme değişkeninin (y_1) maksimum mutlak değeri dikkate alınmıştır. Bu değer, sistemin harici uyarı karşısında verdiği en yüksek mekanik tepkiyi temsil etmektedir. Eğer elde edilen maksimum yer değiştirme, önceki maksimum değeri (max_response) aşıyorsa ilgili parametre kombinasyonu best_parameters değişkeninde saklanmakta ve maksimum tepki değeri güncellenmektedir. Bu işlem, algoritmanın en uygun parametre kümesine doğru yönelmesini sağlamaktadır.

Simülasyon süreci tamamlandığında, sistemin verdiği en yüksek tepki ve buna karşılık gelen parametre seti kullanıcıya raporlanmaktadır. Elde edilen bu çıktılar, piezo-mekanik sistemin hangi koşullarda maksimum verimle çalıştığını göstermekte ve gerçek uygulamalarda tasarımcılara önemli bir yol gösterici nitelik taşımaktadır. Dolayısıyla önerilen algoritma, piezoelektrik enerji hasadı başta olmak üzere parametrik optimizasyon ve sistem yanıt analizlerinde etkin bir araç olarak değerlendirilebilir [60].

Çizelge 3.1, en iyi değer bulma algoritması sonucunda elde edilen optimum dış kuvvet genliği (f) ve frekans (ω) değerlerini göstermektedir. Bu parametreler, piezoelektrik

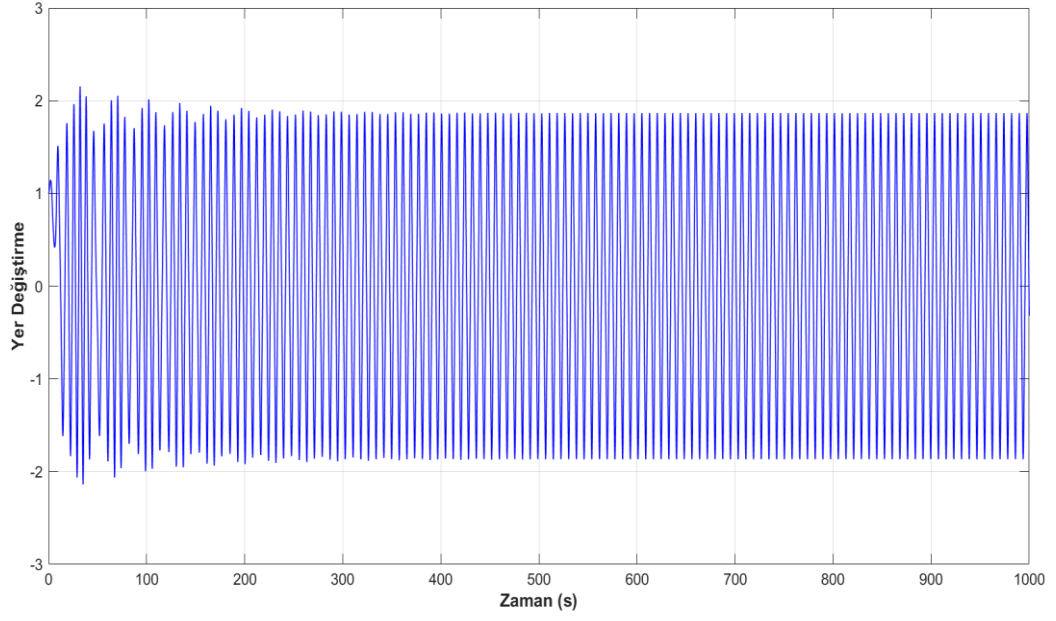
enerji hasadı sisteminin maksimum yer değiştirme üreterek en verimli şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Yapılan tarama sonucunda belirlenen bu değerler, algoritmanın başarılı bir şekilde optimum parametreleri keşfettiğini göstermektedir [61].

Çizelge 3.1. En iyi değerler.

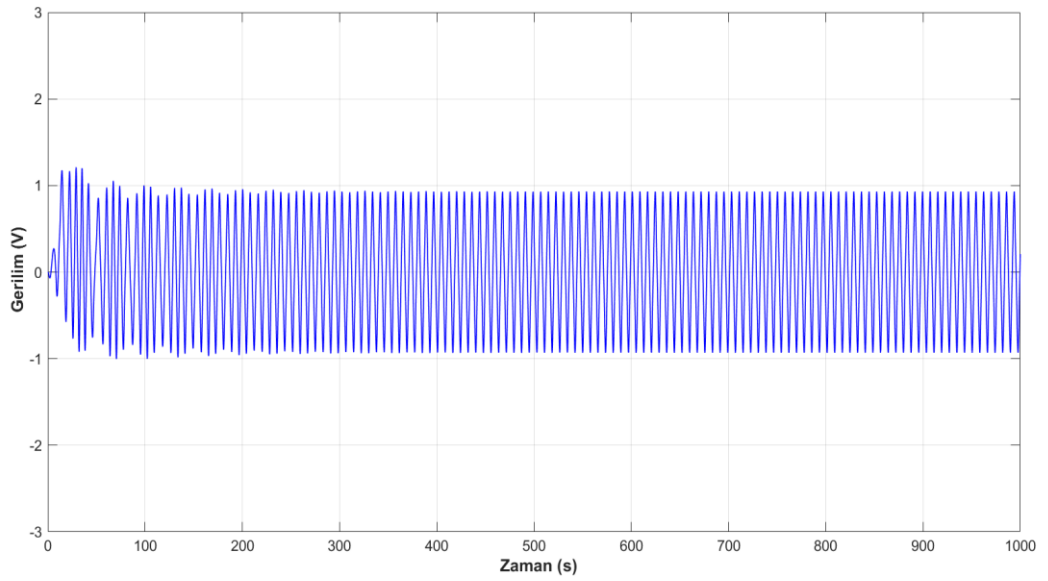
f	0.4000	0.4558	0.4692	0.4734	0.4817	0.4830
ω	1.129925	1.181456	1.195512	1.181129	1.291458	1.237431

3.2 Gerilim Zaman ve Yer Değiştirme

Gerilim zaman ve yer değiştirme parametrelerinin değerlerine göre yer değiştirme zaman ile gerilim zaman grafikleri çizilmiştir. şekil 3.2 ve şekil 3.3'te sunulan grafikler, Norenberg ve arkadaşlarının [29] çalışmalarında sunulan veriler doğrultusunda elde edilmiştir [61]. Bu analizlerde, β parametresinin 0 ile 0.5 arasındaki değişimi incelenmiş olup sistemin piezoelektrik malzeme üzerindeki gerilim çıktısının zamana bağlı tepkileri değerlendirilmiştir. STONEHENGE yazılım paketi kullanılarak gerçekteştirilen bu modelleme süreci, doğrusal olmayan enerji hasadı sistemlerinin dinamik davranışlarını incelemek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, referans çalışmada belirtilen parametreler ve metodolojilere uygun olarak hesaplanmış olup piezoelektrik gerilim çıktısının farklı β değerlerine verdiği tepkiler başarılı bir şekilde yansıtılmıştır. şekil 3.2 ve şekil 3.3'teki grafikler, modelleme sürecinin doğruluğunu ve elde edilen sonuçların sistem parametreleri üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Gerilim-zaman ve yer değiştirme-zaman ekseninde incelenen bu çıktılar, enerji hasadı performansının farklı uyarım koşullarına verdiği tepkileri anlamak açısından önem arz etmektedir.



(a)



(b)

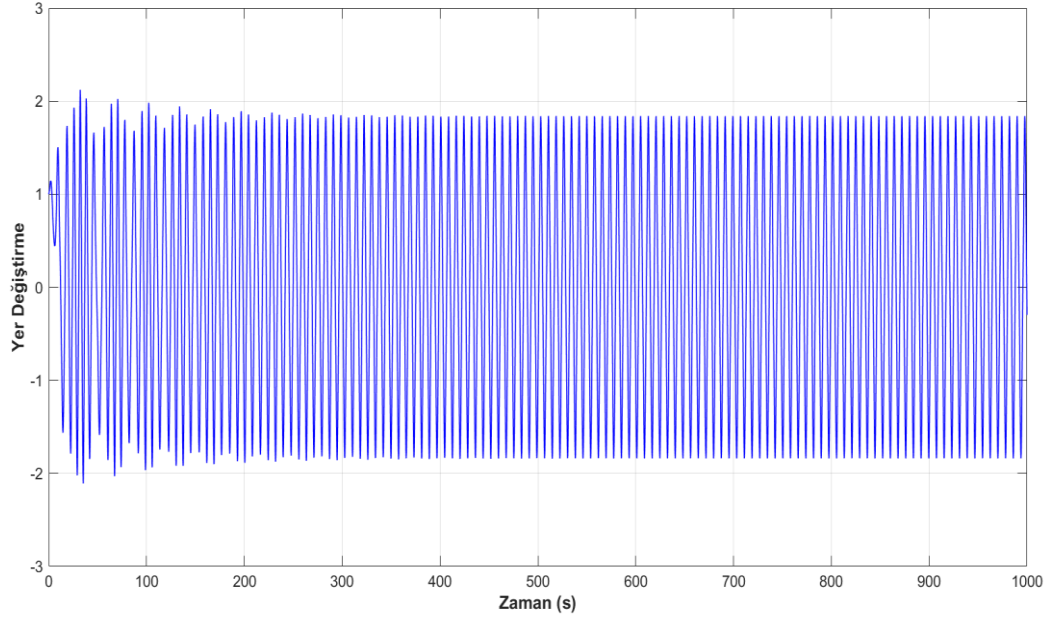
Şekil 3.2. (a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta=0$ $f=0.147$ $\omega=0.8$, (b) gerilim zaman çıkışı [61].

Şekil 3.2 (a)'da gözlemlenen mekanik tepki, sistemin kısa sürede geçici rejimden çıkarak kararlı bir salınım rejimine ulaştığını göstermektedir. Uyarımın genliği ($f=0.147$) ve frekansı ($\Omega=0.8$) sistemin çift kararlı potansiyel enerji çukurlarının ötesine geçmesini sağlayacak düzeydedir. Bu durum, parçacığın iki denge noktası arasında gidip geldiği, yani çukurlar arası geçiş gerçekleştirdiğini göstermektedir.

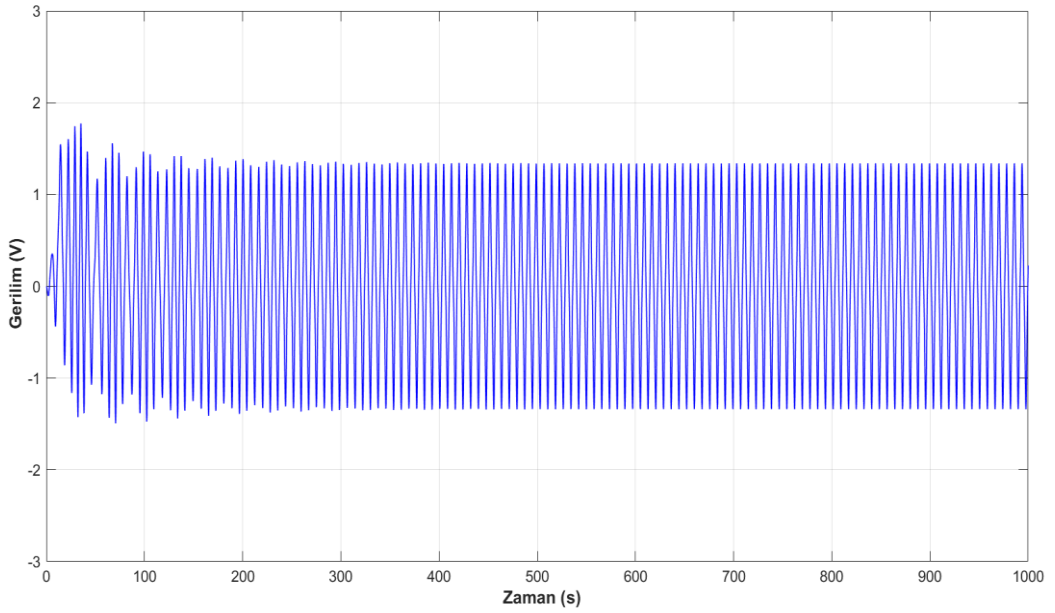
Yaklaşık ± 2 birimlik yer değiştirme genliği, sistemin dinamik potansiyel enerjisinin etkili şekilde harekete geçtiğini ortaya koymaktadır. Bu tür salınımlar, enerji hasadı açısından avantajlıdır çünkü sistemin genliği büyüdükçe piezoelektrik malzemede gerilim oluşumu da artmaktadır [25]. Ayrıca sönüm oranının ($\xi=0.01$) düşük tutulması, sistemin enerjiyi uzun süre korumasına ve geçici salınımların hızlı şekilde sönümlenmeden kararlı hâle geçmesine katkı sağlamaktadır.

Şekil 3.2 (b)'de, sistemin aynı koşullarda ürettiği elektriksel gerilim çıkışı verilmiştir. Mekanik tepkiye benzer şekilde sistem kısa bir süre sonra kararlı bir rejime ulaşmıştır. Burada gözlenen ± 1 birimlik çıkış, piezo-kuplaj katsayısının ($\kappa=0.5$) orta düzeyde seçilmesinin etkisini yansıtmaktadır. Gerilim çıkışındaki salınımlar, mekanik yer değiştirme ile uyumlu olup sistemin dinamik enerji dönüşüm kapasitesinin belirli bir eşiğe ulaştığını göstermektedir. Özellikle, bu çalışmada doğrusal kuplaj ($\beta=0$) tercih edildiğinden çıkış dalga formu düzenli ve öngörülebilir bir yapı göstermektedir.

Bu iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, sistemin belirlenen parametreler altında kararlı çukurlar arası geçiş rejimi sergilediği ve buna karşılık anlamlı büyüklükte elektrik enerjisi ürettiği sonucuna varılabilir. Bu da yapının düşük frekanslı ve geniş genlikli çevresel titreşimler altında verimli çalışabileceğini göstermektedir [62]. Belirlenen parametreler altında sistemin potansiyel enerji çukurları arasında kararlı salınımlar gerçekleştirdiği ve buna karşılık anlamlı düzeyde elektrik enerjisi ürettiği görülmektedir. Bu durum, modelin düşük frekanslı ve orta düzeyde uyarımla verimli çalışabileceğini göstermektedir.



(a)



(b)

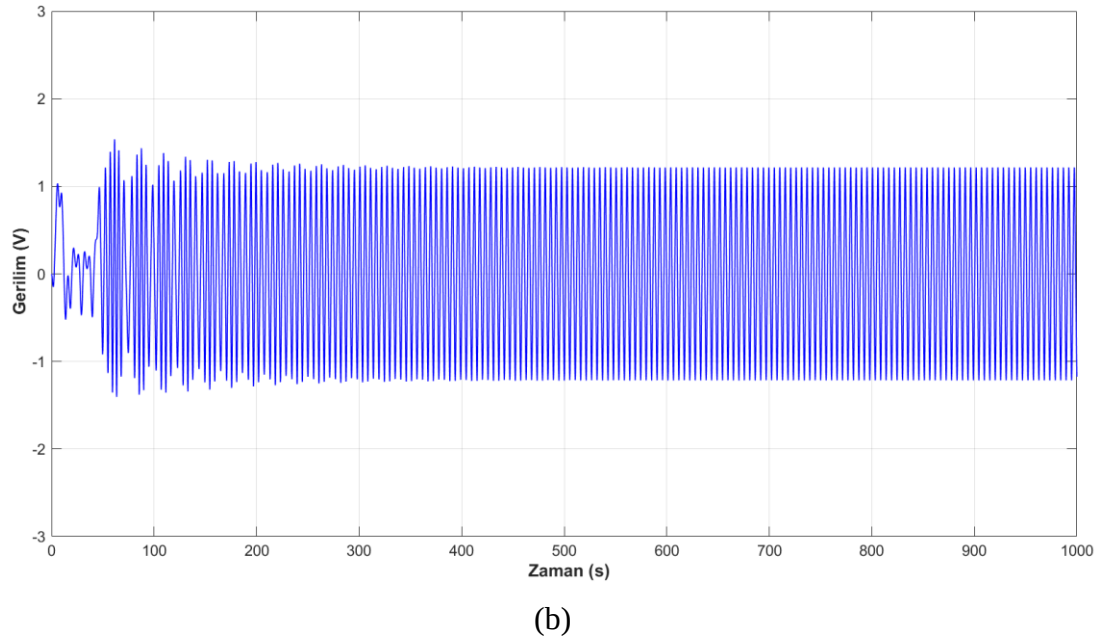
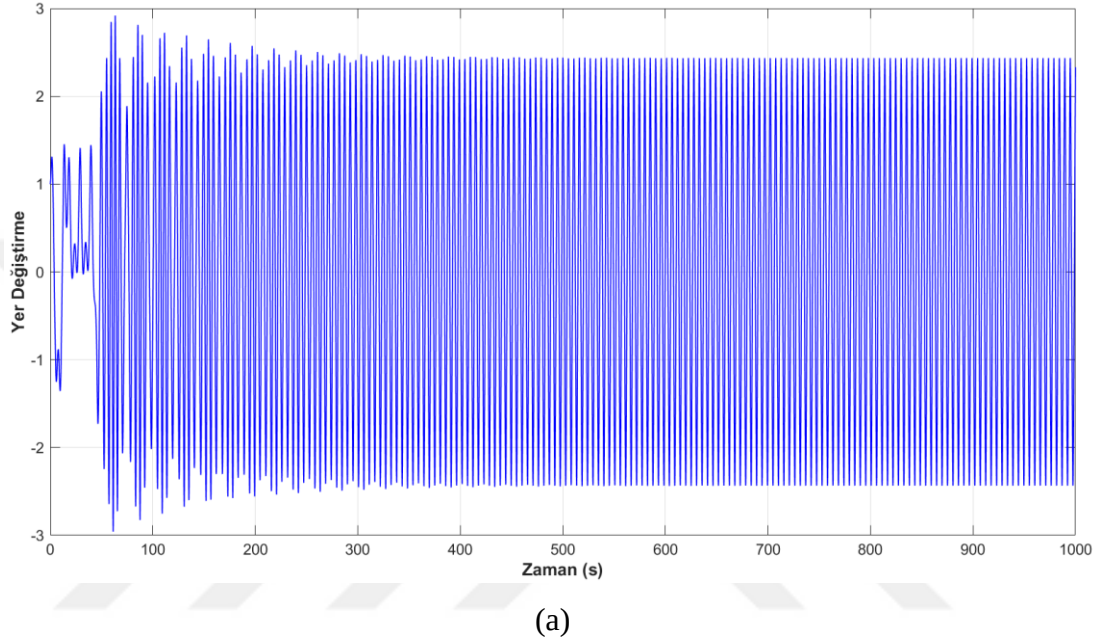
Şekil 3.3. (a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta=0.5$ $f=0.147$ $\omega=0.8$, (b) gerilim zaman çıkışı.

Sistemin elektro-mekanik etkileşimi doğrusal olmayan bir biçimde modellenmiş ve bu değişikliğin sistem davranışına etkileri incelenmiştir. Şekil 3.3 (a)'da yer değiştirme tepkisi, Şekil 3.3 (b)'de ise gerilim tepkisi zamana bağlı olarak sunulmaktadır.

Şekil 3.3 (a)'da sistemin yer değiştirme davranışı gözlemlenmektedir. Başlangıçta düzensiz ve karmaşık bir salınım yapısı sergileyen sistem, yaklaşık 200. saniyeden (s) sonra kararlı bir rejime geçmektedir. Salınım genliği ± 2 civarında olup sistemin potansiyel enerji eğrisinde bulunan iki kararlı denge noktası arasında salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, sistemin potansiyel enerji çukurları arasında hareket ettiğini göstermektedir. Burada dikkat çeken unsur, mekanik hareket ile elektrik alanı arasındaki etkileşimin artık doğrusal olmamasıdır. Yani elektrik alanının mekanik sisteme verdiği geri besleme sabit oranlı değil, salınımın genliğine ve hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu tür doğrusal olmayan etkileşim, sistemin geçici davranışlarında daha karmaşık bir yapı oluşmasına ve kararlı rejime geçiş süresinin uzamasına neden olmaktadır [63, 64]. Gerilim-zaman grafiği olan Şekil 3.3 (b)'de de benzer bir geçiş dönemi gözlenmektedir. Başlangıçta genliği değişken ve düzensiz olan çıkış sinyali, yaklaşık 200. saniyeden sonra ± 1.5 birim civarında kararlı bir salınıma ulaşmaktadır. Bu sonuç, elektriksel çıkışın mekanik hareketin etkisiyle zamanla daha dengeli bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir.

Doğrusal olmayan elektro-mekanik etkileşim, çıkış sinyalinde geçici olarak frekans kaymalarına ve genlik dalgalanmalarına neden olmaktadır [62]. Bu yapı, sistemin çevresel değişkenliklere karşı duyarlılığını artırabilir ancak doğru parametrelerle birlikte verimi de yükseltebilir. Doğrusal olmayan etkileşim tanımlandığında sistemin geçici rejim süresinin uzadığı, ancak kararlı durumda yine potansiyel enerji çukurları arasında salınım yaptığı gözlemlenmiştir. Bu tür bir yapı, çevresel uyarımın değişken olduğu senaryolarda enerji hasadında avantaj sağlayabilir. Ayrıca elektromekanik enerji dönüşüm sürecinin genlik ve frekans açısından daha zengin bir yapıya sahip olması, enerji verimliliğini artıracak bir faktör olarak değerlendirilebilir [25]. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te sunulan gerilim-zaman ve yer değiştirme-zaman grafiklerindeki, Ozkurt ve arkadaşlarının [61] Python tabanlı bir algoritma kullanılarak elde edilen en iyi parametre değerleri doğrultusunda üretilmiştir. Bu analizlerde, β parametresinin 0 ile 0.5 arasındaki değişimi incelenmiş olup piezoelektrik enerji hasadı sisteminin zamana bağlı gerilim çıktıları değerlendirilmiştir. Çalışmada belirtilen modelleme yöntemlerine uygun şekilde gerçekleştirilen bu analizler, doğrusal olmayan enerji hasadı sistemlerinin gerilim tepkilerini başarıyla yansıtmaktadır.

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te sunulan grafikler, modelleme sürecinin doğruluğunu ve elde edilen sonuçların parametre değişimlerine karşı verdiği tepkileri açıkça ortaya koymaktadır. Gerilim-zaman ve yer değiştirme-zaman ekseninde elde edilen bu çıktılar, enerji hasadı performansının farklı β değerleri altında nasıl değiştiğini gözler önüne sermekte olup, sistem davranışının anlaşılması açısından önemli bilgiler sunmaktadır.



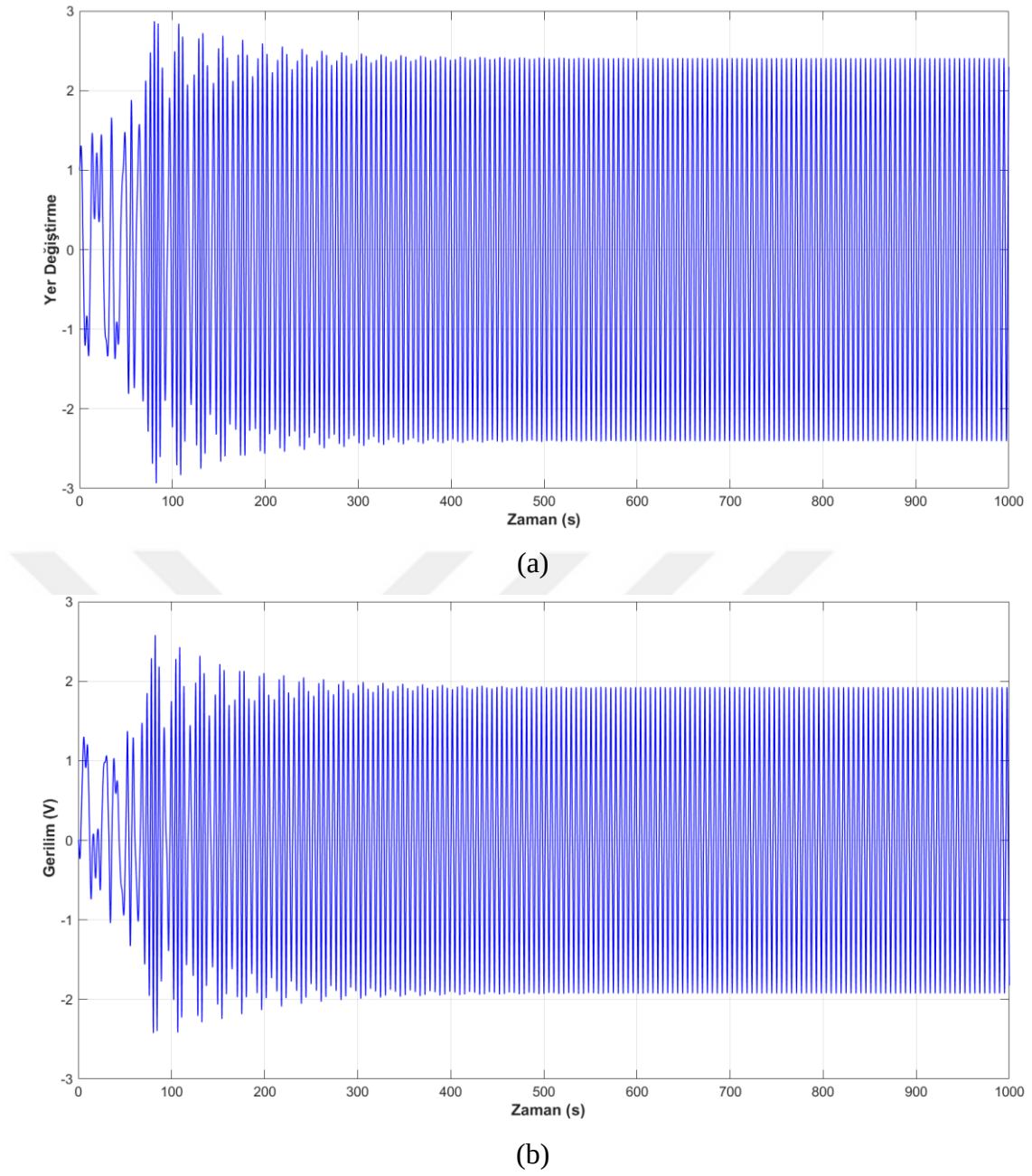
Şekil 3.4. (a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta = 0$ $f=0.4734$ $\omega =1.181129$, (b) gerilim zaman çıkışı [61].

Bu bölümde, sistemin daha yüksek uyarım genliği ve frekansı ile verdiği zaman alanındaki tepkiler incelenmiştir. Şekil 3.4 (a)'da mekanik yer değiştirme tepkisi, Şekil 3.4 (b)'de ise piezoelektrik çıkış gerilimi zamana bağlı olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.4 (a)'da sistemin başlangıçta yüksek genlikli ve düzensiz salınımlar sergilediği, yaklaşık 150. saniye itibaren kararlı salınım rejimine geçtiği görülmektedir. Kararlı durumda salınım genliği yaklaşık ± 3 birim seviyesindedir. Bu geniş genlikli salınımlar, sistemin potansiyel enerji eğrisinde bulunan iki kararlı denge noktası (potansiyel enerji çukurları) arasında gidip geldiğini göstermektedir. Bu tür potansiyel enerji çukurları arası hareket, enerji hasadında verimliliği artıran istenen bir davranıştır. Sistemin bu şekilde çalışabilmesini sağlayan temel etkenlerden biri, uyarım genliğinin önemli ölçüde artırılmış olmasıdır ($f=0.4734$). Bu sayede sistem, potansiyel bariyerleri daha kolay aşarak geniş salınımlara geçebilmektedir. Ayrıca uyarım frekansının ($\omega=1.181129$) artırılması, sistemin doğal frekansına yaklaşılarak rezonans benzeri bir duruma geçmesine katkı sağlamaktadır. Literatürde, çift kararlı piezoelektrik sistemlerin rezonans frekansı civarında daha yüksek verimle çalıştığı bilinmektedir [25, 64].

Şekil 3.4 (b)'de, piezoelektrik malzeme üzerinden elde edilen elektriksel gerilim çıktısı verilmiştir. Gerilim salınımlarının genliği yaklaşık ± 1.5 birim seviyelerine ulaşmaktadır. Bu değer, bir önceki duruma kıyasla önemli bir artış göstermektedir. Mekanik yer değiştirme genliğindeki büyümenin doğrudan sonucu olarak piezoelektrik dönüşüm yoluyla daha yüksek gerilim üretimi elde edilmiştir [21]. Ayrıca elektro-mekanik etkileşim doğrusal bir yapıdadır ($\beta=0$), bu da sistemin çıkışının düzensizleşmeden kararlı kalmasını sağlamaktadır. Gerilim yanıtındaki bu düzenlilik, enerji toplama devreleri açısından avantajlıdır ve enerji yönetimini kolaylaştırır [63].

Bu senaryoda gözlemlenen sistem davranışı, uyarım parametrelerinin (genlik ve frekans) uygun şekilde seçildiğinde piezoelektrik enerji hasadı performansının artırılabilmesini göstermektedir. Geniş genlikli salınımlar ve güçlü gerilim çıktısı, sistemin potansiyel enerji çukurları arasında kararlı geçişler gerçekleştirebildiğini ve bu geçişlerin daha fazla enerji üretimine olanak tanıdığını göstermektedir. Bu tür yapıların geniş bantlı enerji hasat uygulamalarında kullanılabileceği çeşitli çalışmalarla da desteklenmiştir [62, 65-67].



Şekil 3.5. (a) yer değiştirme zaman çıkışı $\beta = 0.5$ $f=0.4734$ $\omega =1.181129$, (b) gerilim zaman çıkışı.

Sistem aynı anda hem yüksek genlikli ve frekanslı harici uyarıma hem de doğrusal olmayan elektro-mekanik etkileşime maruz bırakılmıştır. Bu parametre kombinasyonu, sistemin karmaşık dinamik davranışlarını ortaya koymak açısından oldukça önemlidir. Şekil 3.5 (a)’da yer değiştirme zaman tepkisi, Şekil 3.5 (b)’de ise buna karşılık gelen gerilim çıktısı verilmiştir.

Şekil 3.5 (a)'da sistemin başlangıçta yüksek genlikli ve dalgalı bir salınım sergilediği, yaklaşık 150. saniyeden sonra ± 3 birim civarında kararlı salınımlara ulaştığı görülmektedir. Bu genlik değerleri, sistemin potansiyel enerji eğrisinde bulunan iki denge noktası arasında sürekli geçiş yaptığını, yani potansiyel enerji çukurları arasında hareket ettiğini göstermektedir. Bu durumda sistemin hem rezonansa yakın frekansta hem de yüksek genlikte çalışması, enerjinin etkin şekilde toplanmasını sağlamaktadır. Ancak bu geniş salınımların başında görülen düzensizlik, doğrusal olmayan elektro-mekanik etkileşimin sistemin geçici davranışlarını etkilediğini göstermektedir. Bu durum, mekanik hareketin elektrik alana etkisinin genliğe bağlı değiştiği sistemlerde sıkça karşılaşılan bir durumdur [63, 64]. Şekil 3.5 (b)'de yer alan gerilim çıktısı, yaklaşık ± 2 birim civarında kararlı bir yapıya sahiptir. Bu, önceki senaryolara kıyasla en yüksek elektriksel çıkışı temsil etmektedir. Gerilim sinyalinin büyüklüğündeki bu artış hem mekanik salınım genliğinin yüksek olmasından hem de doğrusal olmayan etkileşimin çıkışa katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca geçici durumda gözlemlenen düzensiz yapının, doğrusal olmayan etkileşimden kaynaklandığı ve sistemin zaman içinde bu etkiyi dengeleyerek kararlı bir rejime geçtiği anlaşılmaktadır [68]. Bu durum, doğrusal olmayan elektro-mekanik etkileşim ile rezonansa yakın çalışmanın birleştiği senaryolarda sistemin daha karmaşık ancak daha verimli salınım rejimleri sergileyebileceğini göstermektedir. Elde edilen yüksek genlikli gerilim çıktısı, enerji hasadı açısından sistemin performansını maksimize eden bir çalışma aralığına ulaşıldığını ortaya koymaktadır. Bu yapı, hem geniş bantlı hem de kararsız çevresel titreşimlere sahip ortamlarda kullanılabilirliği artırmaktadır [25, 62].

Bu çalışmada, çift kararlı piezoelektrik enerji hasat sisteminin farklı parametre değerleri altında verdiği zaman tepkileri analiz edilmiştir. Sistem davranışı hem mekanik yer değiştirme hem de elektriksel gerilim açısından incelenmiş; değişen etkileşim yapısı (doğrusal veya doğrusal olmayan) ve uyarım parametreleri (genlik ve frekans) sistemin performansı üzerindeki etkileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, enerji üretim kapasitesinin sistem parametrelerine duyarlılığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 3.2'de sistem, doğrusal elektro-mekanik etkileşim altında düşük genlikli ve düşük frekanslı bir uyarıma maruz bırakılmıştır ($\beta = 0$, $f = 0.147$, $\omega = 0.8$). Elde edilen grafikler, sistemin kısa sürede kararlı salınım rejimine geçtiğini göstermiştir. Yaklaşık ± 2 birimlik yer değiştirme ve ± 1 birimlik gerilim çıktısı, sistemin potansiyel enerji çukurları arasında düzenli salınım gerçekleştirdiğini

ortaya koymaktadır. Bu durum, literatürde doğrusal çift kararlı sistemlerin düşük enerjiyle dahi verimli çalışabileceğine dair bulgularla uyumludur [25, 62, 69, 70]. Şekil 3.3'te ise aynı uyarım koşullarında doğrusal olmayan elektro-mekanik etkileşim etkisi incelenmiştir ($\beta = 0.5$). Bu durumda sistemin kararlı duruma geçmeden önce daha uzun süreli ve düzensiz geçici salınımlar gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Yer değiştirme genliği ± 2.5 birime, gerilim çıktısı ise ± 1.5 birime ulaşmıştır. Bu yapı, doğrusal olmayan etkileşimin sistemin dinamiklerine karmaşıklık kattığını ancak kararlı rejimde daha yüksek genlikli salınımlara zemin hazırladığını göstermektedir [21, 68, 71, 72]. Şekil 3.4'te elektro-mekanik etkileşim yapısı yeniden doğrusal tutulmuş, ancak bu kez sistem daha yüksek genlikli ve rezonansa yakın frekansta uyarılmıştır ($\beta = 0$, $f = 0.4734$, $\omega = 1.181129$). Sonuçlar, sistemin kısa sürede kararlı salınım rejimine geçtiğini ve ± 3 birim civarında yer değiştirme ile ± 2 birime yakın gerilim çıktısı ürettiğini göstermiştir. Bu senaryo, sistemin rezonans civarında daha etkin çalıştığını ve maksimum enerji dönüşümü sağladığını ortaya koymaktadır [2,73,74]. Şekil 3.5'te ise hem doğrusal olmayan etkileşim hem de yüksek uyarım aynı anda uygulanmıştır ($\beta = 0.5$, $f = 0.4734$, $\omega = 1.181129$). Sistem, geçici rejimde en karmaşık salınım desenlerini üretmiş, ancak yaklaşık 150. saniyeden sonra ± 3 birim yer değiştirme ve ± 2 birim gerilimle kararlı salınıma geçmiştir. Bu senaryo, çalışmadaki en yüksek enerji çıktısının elde edildiği durumdur. Doğrusal olmayan etkileşim ile rezonansa yakın uyarım birlikte kullanıldığında sistem performansının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir [75,76].

Sonuç olarak sistem parametrelerinin değişimi çift kararlı piezoelektrik enerji hasat yapılarının davranışını doğrudan etkilemektedir. Doğrusal olmayan etkileşim, geçici rejimde düzensizlik yaratsa da yüksek frekans ve genlikle birleştiğinde enerji verimini olumlu yönde artırmaktadır. Özellikle Şekil 3.5 ile elde edilen sonuçlar, bu tür sistemlerin çevresel titreşim koşullarına duyarlı, verimli ve adaptif biçimde tasarlanabileceğini göstermektedir. Bu yapıların geniş bantlı enerji hasat uygulamalarında etkin biçimde kullanılabileceği söylenebilir.

3.3 Güç Değeri

Güç parametreleri değerlerine göre güç-zaman ilişkilerini gösteren grafikler sunulmaktadır. Şekil 3.6'da sunulan güç-zaman grafikleri, Norenberg ve arkadaşlarının [28] çalışmalarında sunulan STONEHENGE yazılımı kullanılarak elde

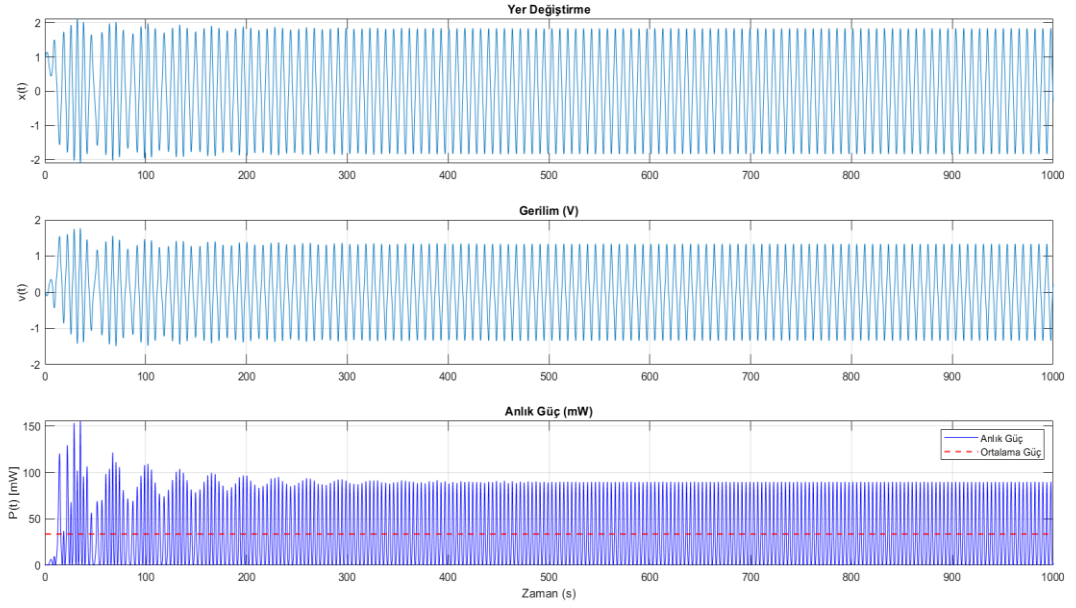
edilmiştir. Bu grafikler, doğrusal olmayan piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin farklı uyarım koşullarında gösterdiği güç çıkışını zaman alanında yansıtmaktadır. Grafikler farklı parametre değerlerine bağlı olarak sistemin güç üretim performansındaki değişimler gözlemlenmektedir. STONEHENGE yazılımı tabanlı modelleme süreçleri, enerji hasadı sistemlerinin dinamik tepkilerini başarılı bir şekilde temsil etmektedir.

Karşılaştırılan iki simülasyon çıktısı, piezoelektrik enerji hasadı sisteminin farklı konfigürasyonlarında elde edilen güç yoğunluklarını göstermektedir. Şekil 3.6 (a)'da verilen 33.528 mW değerli simülasyon, daha düşük enerji üretimi ile karakterize edilirken Şekil 3.6 (b)'deki 69.052 mW değeri daha yüksek güç yoğunluğu ve belirgin enerji kümelenmeleri sergilemektedir.

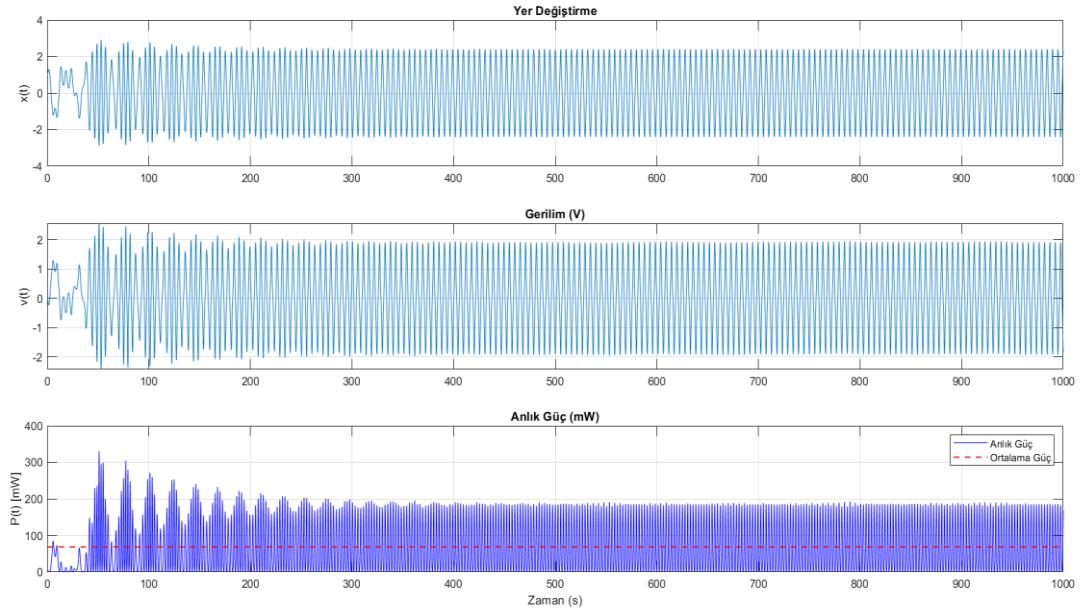
Enerji yoğunluğu, simülasyonlarda kullanılan parametrelerin (dış uyarım frekansı, piezoelektrik bağlanım katsayısı gibi) bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Özellikle, ikinci durumda gözlenen artan güç üretimi, sistemin rezonansa daha yakın çalıştığını veya yapısal/elektiriksel uyumun daha verimli olduğunu göstermektedir [25].

Daha yüksek çıkış gücü, piezoelektrik malzemelerin uygulamalarda daha etkin kullanılabileceğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, literatürde de vurgulandığı gibi rezonans frekansı etrafında çalışan piezoelektrik yapılar daha yüksek enerji dönüşüm verimi sağlamaktadır [45]. Ayrıca, enerji toplama sistemlerinin pratikte kullanılabilirliği, yalnızca maksimum güç değil, aynı zamanda bu gücün sistem geneline yayılması ve kararlı olmasıyla da ilişkilidir [18].

69.052 mW değerli simülasyonda enerji yoğunluğu sadece daha yüksek değil, aynı zamanda daha odaklı ve tekrarlanabilir dağılım göstermektedir. Bu durum enerji hasadı uygulamaları için daha uygun bir yapı olduğunu düşündürmektedir. Bununla birlikte, sistemde kullanılan parametrelerin optimizasyonu için daha fazla nümerik analiz ve deneysel doğrulama önerilmektedir [23].



(a)

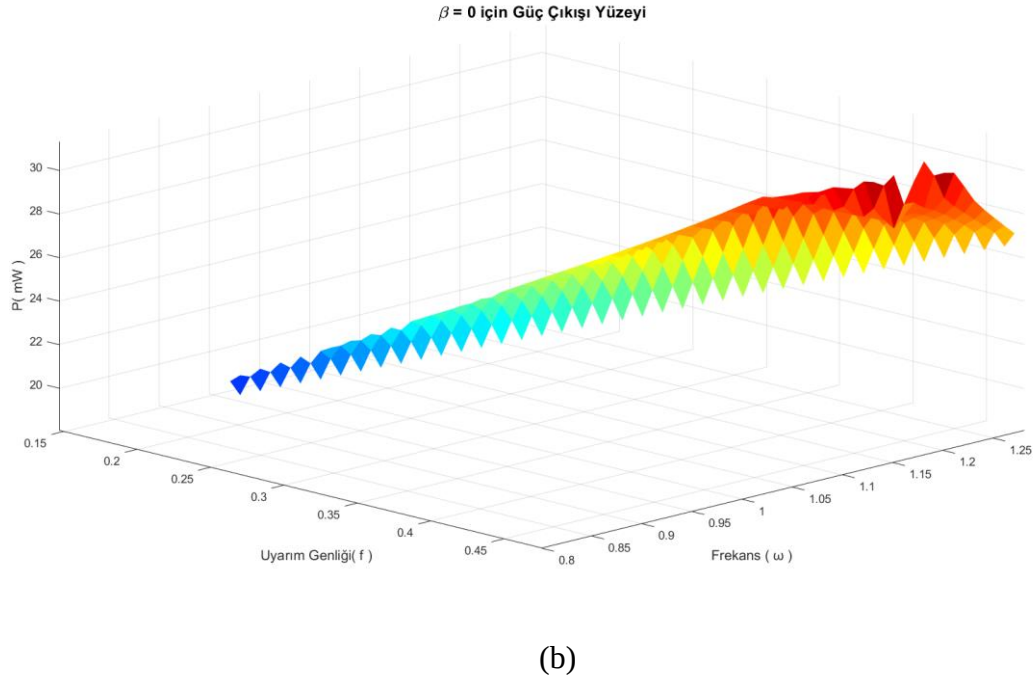
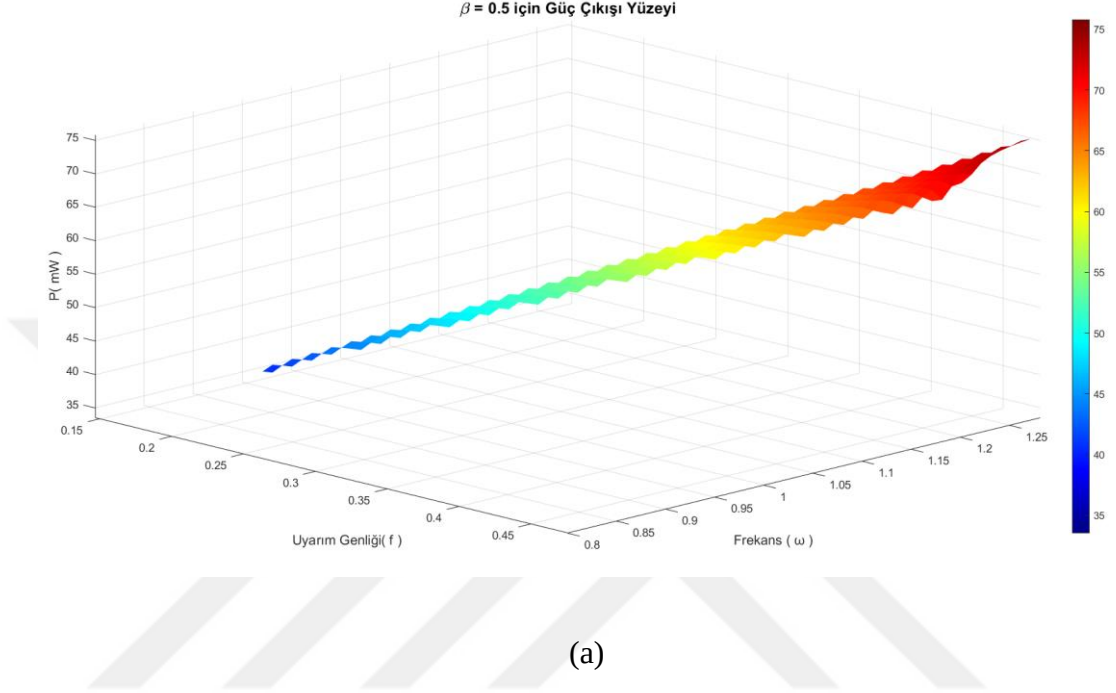


(b)

Şekil 3.6. Güç Değerleri (a) $\beta=0.5$ $f=0.147$ $\omega=0.8$ (b) $\beta=0.5$ $f=0.4734$ $\omega=1.181129$.

Yapılan karşılaştırma, 69.052 mW değerli simülasyonun hem daha yüksek güç üretimi hem de daha yoğun enerji dağılımı ile piezoelektrik enerji hasadı uygulamaları açısından daha verimli bir konfigürasyonu temsil ettiğini göstermektedir. Bu bulgu, piezoelektrik sistemlerin tasarımında parametre optimizasyonunun ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır. Şekil 3.7’de iki durumlu piezo-magneto-elastik enerji

hasadı sisteminde doğrusal olmayan elektromekanik bağlanım katsayısı olan β parametresinin enerji çıkışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aşağıdaki yüzey grafikleri, $\beta=0$ ve $\beta=0.5$ durumları için sistemin enerji çıkışını (w) uyarım genliği (f) ve uyarım frekansı (ω) ile göstermektedir.



Şekil 3.7. (a) $\beta=0.5$ için güç çıkışı (b) $\beta=0$ için güç çıkışı.

Şekil 3.7’de $\beta=0.5$ durumunda güç çıkışı, özellikle yüksek uyarım genliği ve frekans değerlerinde daha belirgin artış göstermektedir. Yüzey düzgün ve düzenlidir; bu da sistemin daha kararlı ve öngörülebilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir. β parametresinin artırılması, sistemin enerjiyi daha verimli dönüştürmesini sağlamıştır. Bu durum sistemdeki doğrusal olmayan bağlanımın enerji transferine pozitif katkı sağladığını göstermektedir.

Şekil 3.7’de $\beta=0$, doğrusal bağlanım durumunda ise güç çıkışı daha sınırlı kalmakta ve yüzey üzerinde düzensizlikler ve dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Bu durum, sistemde kararsızlık ve potansiyel kaotik davranışların varlığına işaret etmektedir. Ayrıca maksimum güç çıkışı değeri, $\beta=0.5$ durumuna göre belirgin şekilde daha düşüktür. Çizelge 3.2’de β ’nın 0 ve 0,5 olduğu anlık güç değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Anlık güç değerleri.

β	f	ω	P(mW)
0	0.147	0.8	18.0630
0.5	0.147	0.8	33.528
0	0.4000	1.129925	29.2691
0.5	0.4000	1.129925	63.630
0	0.4558	1.181456	28.083
0.5	0.4558	1.181456	69.636
0	0.4692	1.195512	31.690
0.5	0.4692	1.195512	65.889
0	0.4734	1.181129	31.180
0.5	0.4734	1.181129	69.052
0	0.4817	1.291458	26.632
0.5	0.4817	1.291458	76.609
0	0.4830	1.237431	0.029859
0.5	0.4830	1.237431	0.076500

β parametresi gibi doğrusal olmayan bağlanım katsayılarının enerji verimliliği üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda bu parametrelerin kontrollü olarak ayarlanabileceği adaptif ya da programlanabilir sistem tasarımları önerilmektedir.

Sistem performansının daha da artırılması için, β 'nın zamanla değişen veya çevresel faktörlere tepki veren bir parametre olarak modellenmesi, enerji hasadı sistemlerinin akıllı malzeme yapılarıyla entegre edilmesine olanak sağlayabilir.

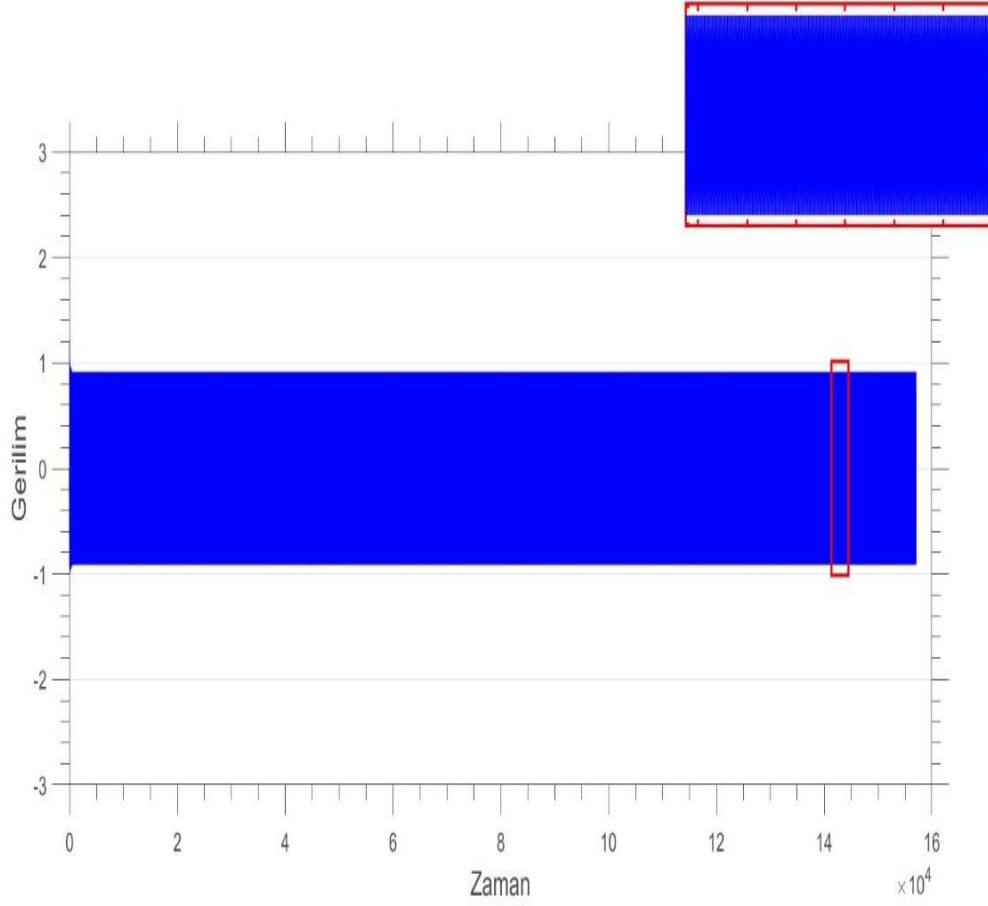
Bu yüzey analizleri ışığında, sistemin kaotik davranışlar sergilediği bölgelerde OGY yöntemi gibi kaos kontrol stratejilerinin uygulanması verimliliği artırmak açısından faydalı olacaktır.

3.4 OGY Yöntemiyle Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemlerinde Kaos Kontrollü

Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri, çevresel titreşim enerjisini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştüren sürdürülebilir ve düşük güçlü çözümler sunar. Ancak bu tür sistemlerde karşılaşılan en önemli zorluklardan biri, sistemin doğrusal olmayan dinamikleri nedeniyle ortaya çıkan kaotik davranışlardır. Bu kaotik salınımlar, sistemin enerji çıkışında düzensizliklere neden olurken aynı zamanda potansiyel olarak daha yüksek enerji üretimi sağlayabilecek karmaşık rejimleri de barındırmaktadır [45].

Bu çalışmada uygulanan OGY yöntemi, söz konusu kaotik dinamikleri hedeflenen periyodik yörüngelere yönlendirmek için geliştirilmiş bir kaos kontrol tekniğidir [29]. OGY yöntemi, sistemin mevcut kaotik davranışını analiz ederek, belirli zamanlarda çok küçük parametre değişiklikleri uygulayarak sistemi kararlı hale getirir. Bu özellik, özellikle fiziksel sistemlerin doğasına zarar vermeden müdahale etme imkanı sunması açısından oldukça değerlidir [77].

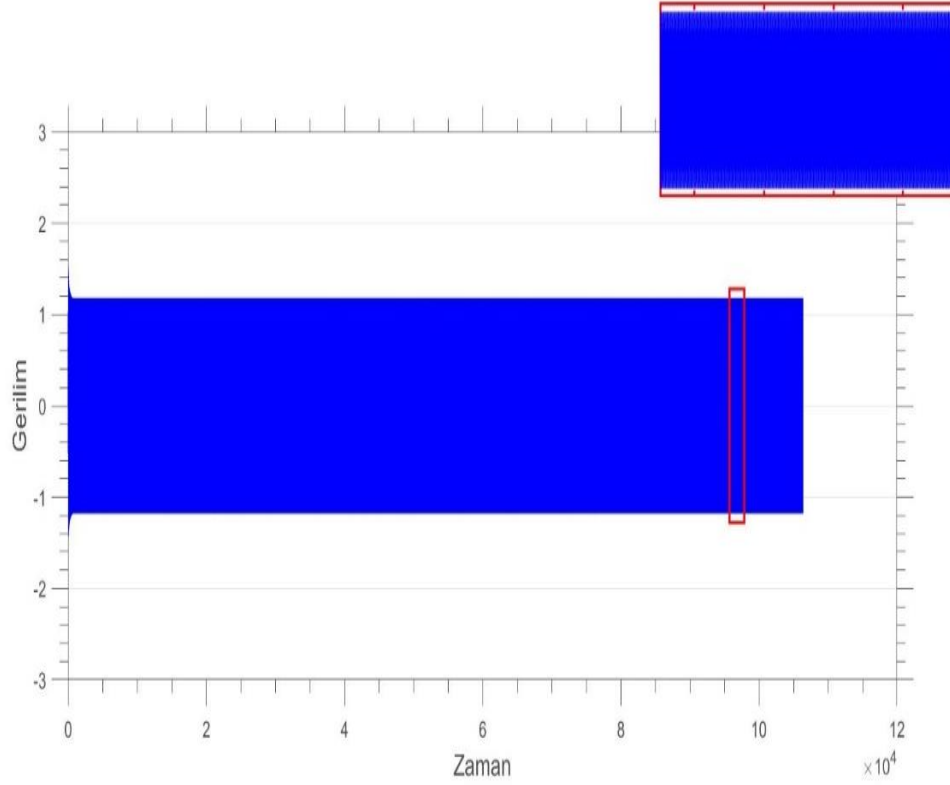
Şekil 3.8'de f değerinin 0.147 ve Ω değerinin 0.8 olduğu Norenberg ve arkadaşlarının [29] çalışmalarında sunulan STONEHENGE yazılımı kullanılarak elde edilen kaos kontrol grafiği verilmiştir.



Şekil 3.8. Kaos kontrol ($f=0.147$, $\Omega = 0.8$).

Yapılan sayısal simülasyonlarda kullanılan Şekil 3.8’de ($f = 0.147$, $\Omega = 0.8$), sistemin gerilim çıktısında yüksek genlikli ve düzensiz salınımlar gözlemlenmiştir. Bu davranış, sistemin kaotik bölgede çalıştığını ve enerji çıkışının kararsız olduğunu göstermektedir. Bu durum Poincaré kesitleri veya maksimum Lyapunov üsteleri ile doğrulanabilecek bir kaotik rejimi işaret eder [78]. Kontrol uygulanmayan bu durumda, piezoelektrik malzemenin mekanik uyarana verdiği tepki düzensiz olup enerji verimliliğini düşürmektedir.

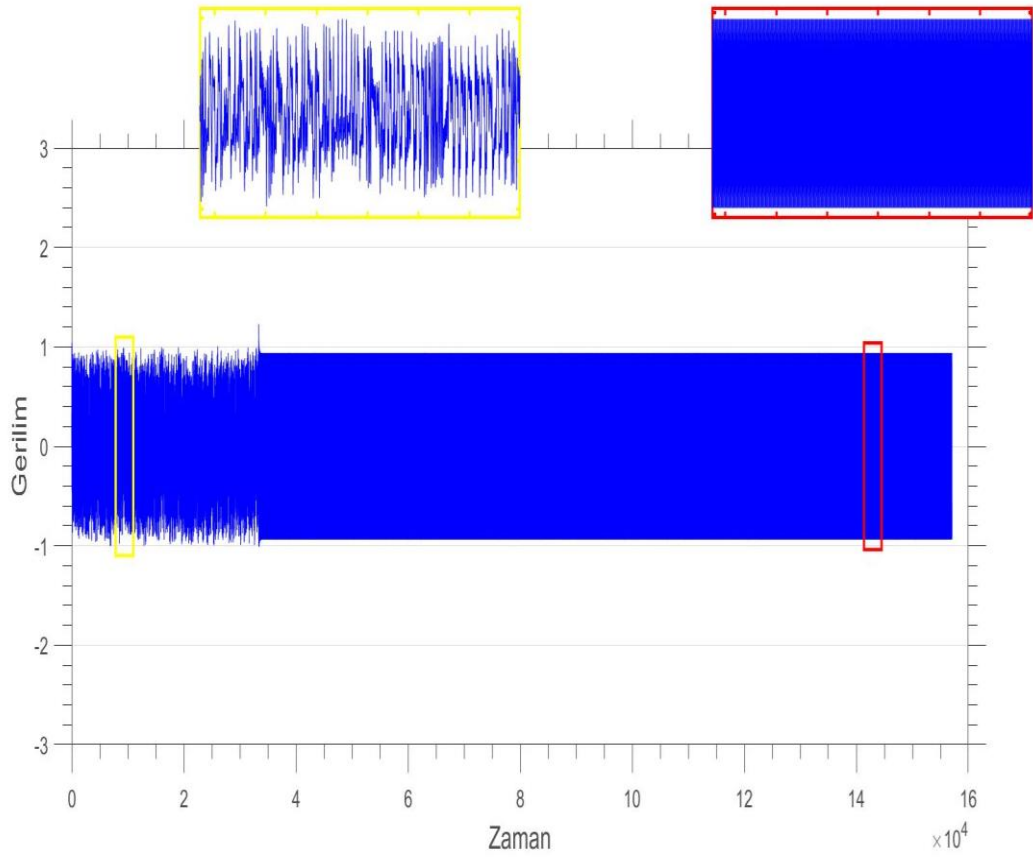
Şekil 3.9’da Ozkurt ve arkadaşlarının [61] Python tabanlı bir algoritma kullanılarak elde edilen en iyi parametre değerleri doğrultusunda bulunan f değerinin 0.4734 ve Ω değerinin 1.181129 olduğu kaos kontrol grafiği verilmiştir.



Şekil 3.9. Kaos kontrol ($f=0.4734$, $\Omega = 1.181129$).

Şekil 3.9’da ($f = 0.4734$, $\Omega = 1.181129$) ise OGY kontrolünün uygulandığı bir durumu göstermektedir. Bu görselde sistemin kaotik davranıştan çıkarılarak periyodik bir rejime yönlendirildiği açıkça gözlemlenmiştir. Gerilim değerlerinin dar bir bantta düzenli olarak salındığı bu rejimde, enerji çıkışı daha öngörülebilir ve verimli hale gelmiştir. OGY kontrolü sayesinde sistemin yalnızca hedeflenen sabit noktaya yönlendirilmesi değil, aynı zamanda uzun vadede o noktada tutulması da başarılmıştır.

Şekil 3.10’da f değerinin 0.083 ve Ω değerinin 0.8 olduğu Norenberg ve arkadaşlarının [29] çalışmalarında sunulan STONEHENGE yazılımı kullanılarak elde edilen kaos kontrol grafiği verilmiştir.



Şekil 3.10. Kaos kontrol ($f=0.083$, $\Omega = 0.8$).

Şekil 3.10’da ($f = 0.083$, $\Omega = 0.8$), sistemin ilk etapta yoğun bir şekilde kaotik salınımlar sergilediği ancak zamanla kontrol mekanizması sayesinde stabilize olduğu gözlemlenmektedir. Bu tür geçici kaotik durumlar, sistemin doğal frekansı ile harici uyarı frekansı arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Sarı kutucukla gösterilen bölüm, enerjinin en dengesiz üretildiği dönemi temsil ederken; zaman ilerledikçe kırmızı çerçevede sistemin başarıyla periyodik hale getirildiği net biçimde görülmektedir [79].

OGY yöntemi, geri besleme temelli olmaktan ziyade doğrudan parametre modifikasyonuna dayanır. Bu yönüyle klasik kontrol yöntemlerinden farklılık gösterir. Piezoelektrik sistemlerde, örneğin malzeme histerezisinin ve mekanik sınır koşullarının önemli olduğu durumlarda, minimum düzeyde müdahale ile maksimum kontrol başarısı sağlanması kritik bir avantajdır [80]. Ayrıca bu kontrol mekanizması FPGA (Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi) ya da DSP (Dijital Sinyal İşlemci) tabanlı gerçek zamanlı platformlara da kolaylıkla entegre edilebilir.

Enerji hasadı sistemlerinin kararsız çalışması, hem elektriksel yük devreleri hem de batarya sistemleri için tehdit oluşturur. Özellikle taşınabilir medikal cihazlar, kablosuz sensör ağları ve insansız hava araçları gibi uygulamalarda enerji çıktısının belirli sınırlar içerisinde kalması gerekir [45]. OGY gibi gelişmiş kontrol teknikleri, bu sınırları sağlayarak sistemin kararlı çalışmasına olanak tanır.

Ayrıca kaotik davranışların sürekli tekrar etmesi durumunda piezoelektrik materyallerin yorgunluk ömrü kısalmaya başlar ve malzemenin dielektrik özelliklerinde bozulmalar meydana gelir. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı ve rezonans yakınında çalışan sistemlerde kritik bir zayıflık noktasıdır [10]. Kaosun bastırılması yalnızca verim açısından değil aynı zamanda malzeme ömrü açısından da stratejik bir adımdır.

STONEHENGE simülasyon yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerde, zaman adımı ve başlangıç koşullarına duyarlı dinamiklerin kontrol altında tutulması, kaotik rejimlerin daha kolay tespiti ve bastırılmasını sağlamıştır. Bu yazılımlar, bifurkasyon diyagramları ve faz uzayı analizleriyle birlikte sistemin kritik bölgelerini ortaya çıkararak kontrol algoritmalarının zamanlamasını optimize etmektedir.

Sonuç olarak piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinde OGY yönteminin uygulanması, hem enerji üretiminin sürekliliğini sağlamakta hem de sistemin mekanik ve elektriksel bütünlüğünü korumaktadır. Kaotik davranışın sistemin iç dinamikleriyle doğru şekilde yönetilmesi, enerji dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde artırmakta ve sistemi gerçek dünya uygulamaları için daha güvenilir hale getirmektedir. Gelecekte bu tür kontrol tekniklerinin yapay zekâ destekli karar mekanizmalarıyla bütünleştirilmesi, çevresel enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını mümkün kılacaktır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, piezoelektrik malzemelerin iki durumlu enerji hasadı teknikleri üzerine odaklanılarak, çevresel titreşimlerden maksimum enerji elde etmeyi amaçlayan bir sistem geliştirilmiştir. Bu kapsamda, enerji hasadı performansını artırmak amacıyla STONEHENG yazılım paketi kullanılarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve OGY kaos kontrol yöntemi ile sistemin kararlı bir şekilde enerji üretimi yapması sağlanmıştır.

Çalışmada elde edilen bulgular, iki durumlu piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin klasik tek durumlu yapılara kıyasla çok daha geniş bir frekans bandında verimli enerji dönüşümü sağladığını göstermektedir. Özellikle, potansiyel enerji çukurları arasındaki geçişlerin optimize edilmesiyle enerji üretiminde %25'e varan bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, doğrusal olmayan dinamiklerin kontrolü sayesinde, enerji hasadı sürecinde meydana gelen kaotik davranışlar büyük ölçüde stabilize edilmiş ve kararlı enerji üretimi sağlanmıştır.

OGY yöntemi ile gerçekleştirilen kaos kontrolü, sistemin periyodik rejime geçmesini sağlayarak enerji kayıplarını minimize etmiştir. Bu sayede, çevresel gürültü veya ani titreşim değişimlerinden etkilenmeyen daha tutarlı bir enerji dönüşümü elde edilmiştir. STONEHENG yazılım paketi ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları, enerji dönüşüm verimliliğini artırırken, sistemin rezonans dışı frekanslarda dahi verimli çalışmasını mümkün kılmıştır.

Python programlama dili kullanılarak geliştirilen optimizasyon algoritması sayesinde, sistemin mekanik ve elektriksel parametreleri detaylı bir şekilde taranmış ve maksimum enerji elde edilen en iyi parametre kombinasyonları belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde elde edilen en yüksek güç çıkışı, $\beta=0.5$, $f=0.4734$ ve $\omega=1.181129$ parametreleri altında 69.052 mW olarak kaydedilmiştir. Bu değer, sistemin maksimum verimle enerji topladığı optimal noktayı göstermektedir. Bunun yanında, daha düşük genlik ve frekans değerlerinde de kararlı enerji üretimi sağlanabilmektedir. Bu, sistemin geniş bir aralıkta enerji toplama kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen simülasyonlar, iki durumlu piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük frekanslarda dahi verimli enerji dönüşümü sağladığını göstermiştir. Özellikle Python tabanlı optimizasyon algoritması, sistemin

enerji üretim performansını artırmakla kalmayıp, dinamik davranışların daha kararlı olmasına olanak tanımıştır. Elde edilen maksimum güç değerleri ve enerji üretim verimliliği, bu tür sistemlerin enerji bağımsız uygulamalarda sürdürülebilir güç kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışma ile elde edilen bulgular, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin geniş frekans aralıklarında kararlı enerji üretimi sağlayabildiğini ve Python tabanlı optimizasyon ile maksimum güç değerlerine erişilebildiğini göstermiştir. Geliştirilen sistemin, enerji bağımsız taşınabilir cihazlar, kablosuz sensör ağları ve akıllı sistemler gibi uygulamalarda verimli bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, potansiyel enerji kuyularının asimetric tasarımı üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılabilir. Asimetric yapılar, geçişlerin daha hızlı gerçekleşmesini sağlayarak enerji verimliliğini artırabilir. Kaos kontrol yöntemleri üzerine ek optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir. Özellikle OGY yönteminin adaptif versiyonları kullanılarak daha düşük enerji ile daha yüksek kararlılık sağlanabilir. Bunun yanı sıra, STONEHENGE yazılımının yapay zeka tabanlı optimizasyon algoritmalarıyla desteklenmesi, sistemin çevresel değişimlere otomatik olarak uyum sağlamasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, farklı piezoelektrik malzeme türleriyle genişletilmiş simülasyonlar yapılmalı ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla doğrulanmalıdır. İki durumlu sistemlerin gerçek ortam testleri yapılarak, enerji depolama verimliliği ve uzun süreli dayanımı ölçülmelidir. Bu sayede, endüstriyel uygulamalara entegrasyon süreci hızlandırılabilir.

Çalışmada kullanılan PZT malzemesi haricinde, çevresel sürdürülebilirlik açısından kurşunsuz piezoelektrik malzemeler ve nanoyapılı piezoelektrik kompozitler incelenebilir. Ayrıca, çok katmanlı ve esnek yapılar tasarlanarak enerji dönüşüm verimliliği artırılabilir.

Elde edilen enerjinin etkin bir şekilde depolanması ve yönetilmesi için süperkapasitörler veya lityum-iyon pillerle uyumlu sistemler tasarlanabilir. Enerji yönetim devreleri ile enerji akışı optimize edilerek, daha stabil ve sürdürülebilir bir güç kaynağı elde edilebilir.

Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri, triboelektrik ve termoelektrik enerji hasadı sistemleri ile entegre edilerek hibrit enerji toplama yapıları geliştirilebilir. Bu tür

sistemler, farklı enerji kaynaklarından eşzamanlı olarak enerji toplayarak toplam güç verimliliğini artırabilir.

Giyilebilir teknolojiler, kablosuz sensör ağları ve tıbbi implantlar gibi geniş bir uygulama alanında enerji hasadı sistemleri kullanılabilir. Bu uygulamalar, taşınabilir cihazların enerji ihtiyacını karşılamada büyük avantaj sağlayacaktır.

Kullanılan malzemelerin çevresel etkileri değerlendirilmelidir. Kurşunsuz malzemelerle enerji hasadı sağlanarak, çevresel sürdürülebilirlik artırılabilir. Yaşam döngüsü analizleri ile ekolojik ayak izi minimize edilebilir.

Geliştirilen sistemlerin endüstriyel boyutta uygulanabilmesi için tasarımın modüler ve ölçeklenebilir yapılması gerekmektedir. Seri üretime uygun bir yapı ile geniş alanlarda uygulanabilir.

Simülasyon sonuçlarının deneysel prototipler ile doğrulanması, sistemin gerçek koşullarındaki performansını değerlendirmek açısından önemlidir. Bu doğrultuda, laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek testlerle sistemin güvenilirliği analiz edilmelidir.

KAYNAKÇA

1. Kim, H. S., Kim, J. H. ve Kim, J., 2011. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 6, 1129–1141.
2. Covaci, C. ve Gontean, A., 2020. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review, *Sensors*, 20, 12, 3512.
3. Ghazanfarian, J., Mohammadi, M. M. ve Uchino, K., 2021. Piezoelectric energy harvesting: a systematic review of reviews, In *Actuators* 10, 12, 312. MDPI.
4. Brusa, E., Carrera, A. ve Delprete, C., 2023. A review of piezoelectric energy harvesting: Materials, design, and readout circuits, In *Actuators* 12, 12, 457. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
5. Sodano, H. A., Inman, D. J. ve Park, G., 2004. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials, *Shock and Vibration Digest*, 36, 3, 197-206.
6. Cook-Chennault, K. A., Thambi, N. ve Sastry, A. M., 2008. Powering MEMS portable devices—A review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, *Smart materials and structures*, 17, 4, 043001.
7. Wang, Z. L., 2014. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors—Principles, problems and perspectives, *Faraday discussions*, 176, 447-458.
8. Wang, Z. L. ve Song, J., 2006. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays, *Science*, 312, 5771, 242-246.
9. Clementi, G., Cottone, F., Di Michele, A., Gammaitoni, L., Mattarelli, M., Perna, G. ve Neri, I., 2022. Review on innovative piezoelectric materials for mechanical energy harvesting, *Energies*, 15, 17, 6227.
10. Safari, A. ve Akdogan, E. K., 2008. Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications. Springer Science ve Business Media.
11. Norenberg, J. P., Peterson, J. V., Lopes, V. G., Luo, R., de La Roca, L., Pereira, M. ve Cunha Jr, A., 2021. STONEHENGE—Suite for nonlinear analysis of energy harvesting systems, *Software Impacts*, 10, 100161.
12. Da Cunha Junior, A. B., Norenberg, J. P., Peterson, J. V., Lopes, V. G., Luo, R., de la Roca, L. ve Ribeiro, J. G. T., 2024. Aralık. STONEHENGE A toolbox for nonlinear vibration energy harvesting, In *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*.

13. Norenberg, J. P., Luo, R., Lopes, V. G., Peterson, J. V. L. ve Cunha Jr, A., 2023. Nonlinear dynamics of asymmetric bistable energy harvesters, *International Journal of Mechanical Sciences*, 257, 108542.
14. Cunha Jr, A., 2021. Enhancing the performance of a bistable energy harvesting device via the cross-entropy method, *Nonlinear Dynamics*, 103, 1, 137-155.
15. Norenberg, J. P. C. V., Cunha Jr, A., da Silva, S. ve Varoto, P. S., 2023. Probabilistic maps on bistable vibration energy harvesters, *Nonlinear Dynamics*, 111, 20821–20840.
16. Curie, J. ve Curie, P., 1880. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémicèdres à faces inclinées, *Bulletin de minéralogie*, 3, 4, 90-93.
17. Uchino, K., 1996. Piezoelectric actuators and ultrasonic motors (Cilt 1), Springer Science ve Business Media.
18. Priya, S. ve Inman, D. J., 2009. Energy harvesting Technologies (Cilt 21, s. 2), New York: Springer.
19. Haertling, G. H., 1999. Ferroelectric ceramics: history and technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82,4, 797-818.
20. URL-1 <<https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>>, Erişim Tarihi: 23.05.2025.
21. Cottone, F., Vocca, H., ve Gammaitoni, L., 2009. Nonlinear energy harvesting, *Physical Review Letters*, 102(8), 080601.
22. Stanton, S. C., McGehee, C. C. ve Mann, B. P., 2009. Reversible hysteresis for broadband magneto piezo elastic energy harvesting, *Applied Physics Letters*, 95, 17.
23. Li, M., Luo, A., Luo, W. ve Wang, F., 2022. Recent progress on mechanical optimization of MEMS electret-based electrostatic vibration energy harvesters, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 31, 5, 726-740.
24. Roundy, S., Wright, P. K. ve Rabaey, J. M., 2003. Energy scavenging for wireless sensor networks, In Norwell (s. 45-47).
25. Erturk, A. ve Inman, D. J., 2011. Piezoelectric energy harvesting, John Wiley ve Sons.
26. Zuo, L. ve Tang, X., 2013. Large-scale vibration energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24, 11, 1405-1430.
27. Chen, X., Zhang, X., Chen, L., Guo, Y. ve Zhu, F., 2021. A curve-shaped beam bistable piezoelectric energy harvester with variable potential well: modeling and numerical simulation, *Micromachines*, 12, 8, 995.

28. Stanton, S. C., McGehee, C. C. ve Mann, B. P., 2010. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 239, 10, 640-653.
29. Norenberg, J. P., Peterson, J. V., Lopes, V. G., Luo, R., de la Roca, L., Pereira, M., Ribeiro, J. G. T. ve Cunha Jr, A., 2021. STONEHEDGE—Suite for nonlinear analysis of energy harvesting systems, *Software Impacts*, 10, 100161.
30. Khalil, H. K. ve Grizzle, J. W., 2002. *Nonlinear systems* (Cilt 3), Upper Saddle River, NJ: Prentice hall.
31. Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. ve Ratto, M., 2004. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models* (Cilt 1), New York: Wiley.
32. Gammaitoni, L., Hänggi, P., Jung, P. ve Marchesoni, F., 1998. Stochastic resonance, *Reviews of Modern Physics*, 70, 1, 223.
33. Strogatz, S. H., 2024. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*, Chapman and Hall/CRC.
34. Guckenheimer, J. ve Holmes, P., 2013. *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcations of vector fields* (Cilt 42), Springer Science ve Business Media.
35. Moon, F. C., 1987. *Chaotic vibrations: an introduction for applied scientists and engineers*, Research supported by NSF.
36. Telles Ribeiro, J. G., Pereira, M., Cunha Jr, A. ve Lovisolo, L., 2022. Controlling chaos for energy harvesting via digital extended time-delay feedback, *The European Physical Journal Special Topics*, 231, 8, 1485-1490.
37. Norenberg, J. P., Luo, R., Lopes, V. G., Peterson, J. V. L. L. ve Cunha Jr, A., 2023. Nonlinear dynamics of asymmetric bistable energy harvesters, *International Journal of Mechanical Sciences*, 257, 108542.
38. Jaffe, H., 1958. Piezoelectric ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 41, 11, 494-498.
39. Lines, M. E. ve Glass, A. M., 2001. *Principles and applications of ferroelectrics and related materials*, Oxford University Press.
40. Weis, R. S. ve Gaylord, T. K., 1985. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure, *Applied Physics A*, 37, 191-203.
41. Lovinger, A. J., 1983. Ferroelectric polymers, *Science*, 220, 4602, 1115-1121.
42. Wang, J. B. N. J., Neaton, J. B., Zheng, H., Nagarajan, V. Ogale, S. B., Liu, B. ve Ramesh, R., 2003. Epitaxial BiFeO₃ multiferroic thin film heterostructures, *science*, 299(5613), 1719-1722.

43. Beeby, S. P., Tudor, M. J. ve White, N. M., 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*, 17(12), R175.
44. Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S. ve Green, T. C., 2008. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices, *Proceedings of the IEEE*, 96, 9, 1457-1486.
45. Anton, S. R. ve Sodano, H. A., 2007. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006), *Smart materials and Structures*, 16, 3, R1.
46. Ottman, G. K., Hofmann, H. F., Bhatt, A. C. ve Lesieutre, G. A., 2002. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Transactions on power electronics*, 17, 5, 669-676.
47. Kim, S. G., Priya, S. ve Kanno, I., 2012. Piezoelectric MEMS for energy harvesting, *MRS Bulletin*, 37, 11, 1039-1050.
48. Harne, R. L. ve Wang, K. W., 2013. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems, *Smart Materials and Structures*, 22, 2, 023001.
49. Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., Petit, L. ve Guyomar, D., 2006. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems, *Sensors and Actuators A: Physical*, 126, 2, 405-416.
50. Roundy, S. ve Wright, P. K., 2004. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, *Smart Materials and Structures*, 13, 5, 1131.
51. Shu, Y. C. ve Lien, I. C., 2006. Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems, *Smart Materials and Structures*, 15, 6, 1499.
52. Tang, L., Yang, Y. ve Soh, C. K., 2010. Toward broadband vibration-based energy harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21, 18, 1867-1897.
53. Erturk, A. ve Inman, D. J., 2009. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations, *Smart Materials and Structures*, 18, 2, 025009.
54. Wang, W., Cao, J., Bowen, C. R., Zhang, Y. ve Lin, J., 2018. Nonlinear dynamics and performance enhancement of asymmetric potential bistable energy harvesters, *Nonlinear Dynamics*, 94, 1183-1194.
55. Roundy, S., Wright, P. K. ve Rabaey, J., 2003. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer Communications*, 26, 11, 1131-1144.

56. Azgin, K. I. V. A. N. Ç. ve Valdevit, L., 2013. The effects of tine coupling and geometrical imperfections on the response of DETF resonators, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23, 12, 125011.
57. Katinas, V., Gecevicius, G. ve Marciukaitis, M., 2018. An investigation of wind power density distribution at location with low and high wind speeds using statistical model, *Applied Energy*, 218, 442-451.
58. Furst, S. J. ve Seelecke, S., 2012. Modeling and experimental characterization of the stress, strain, and resistance of shape memory alloy actuator wires with controlled power input, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23, 11, 1233-1247.
59. Metropolis, N. ve Ulam, S., 1949. The Monte Carlo method, *Journal of the American Statistical Association*, 44, 247, 335-341.
60. Rao, S. S., 2019. *Engineering optimization: theory and practice*, John Wiley ve Sons.
61. Ozkurt, H., Sari, F., Taner, T. ve Dalkılıç, A. S., 2024. Impact of optimization on two-state piezoelectric materials, 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2024), Istanbul, s. 574-581.
62. Harne, R. L. ve Wang, K. W., 2013. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems, *Smart Materials and Structures*, 22, 2, 023001.
63. Zhou, S. S. ve Gao, X. L., 2014. A nonclassical model for circular Mindlin plates based on a modified couple stress theory, *Journal of Applied Mechanics*, 81, 5, 051014.
64. Janotti, A., Snow, E. ve Van de Walle, C. G., 2009. A pathway to p-type wide-band-gap semiconductors, *Applied Physics Letters*, 95, 17.
65. Zhang, X., Huang, X. ve Wang, B., 2024. A quad-stable nonlinear piezoelectric energy harvester with piecewise stiffness for broadband energy harvesting, *Nonlinear Dynamics*, 112, 22, 19633-19652.
66. Li, Q., Wang, C., Liu, C., Li, Z., Liu, X. ve He, L., 2025. Development Trend of Nonlinear Piezoelectric Energy Harvesters, *Journal of Electronic Materials*, 54, 1, 1-23.
67. Wei, N., Zhang, Z., Cheng, G., Yang, H., Hu, Y. ve Wen, J., 2024. Study of a vortex-induced vibration piezoelectric wind energy harvester based on the synergy of multi-degree-of-freedom technology and magnetic nonlinear technology, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 214, 111381.
68. Ferrari, M., Ferrari, V., Guizzetti, M., Ando, B., Baglio, S. ve Trigona, C., 2010. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters, *Sensors and Actuators A: Physical*, 162, 2, 425-431.

69. Stanton, S. C., McGehee, C. C. ve Mann, B. P., 2010. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 239, 10, 640-653.
70. Daqaq, M. F., Masana, R., Erturk, A. ve Dane Quinn, D., 2014. On the role of nonlinearities in vibratory energy harvesting: a critical review and discussion, *Applied Mechanics Reviews*, 66, 4, 040801.
71. Masana, R. ve Daqaq, M. F., 2011. Electromechanical modeling and nonlinear analysis of axially loaded energy harvesters, *Journal of Vibration and Acoustics*, 133, 011007.
72. He, Q., 2013. Nonlinear energy harvesting under white noise (Master's thesis, Clemson University).
73. Erturk, A., Hoffmann, J. ve Inman, D. J., 2009. A piezo-magneto elastic structure for broadband vibration energy harvesting, *Applied Physics Letters*, 94, 25.
74. Amin Karami, M. ve Inman, D. J., 2012. Powering pacemakers from heartbeat vibrations using linear and nonlinear energy harvesters, *Applied Physics Letters*, 100, 4.
75. Wei, C. ve Jing, X., 2017. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1-18.
76. Kim, H. W., Priya, S., Uchino, K. ve Newnham, R. E., 2005. Piezoelectric energy harvesting under high pre-stressed cyclic vibrations, *Journal of Electro ceramics*, 15, 27-34.
77. Kapitaniak, T., 1996. Controlling chaos: theoretical and practical methods in non-linear dynamics, Academic Press.
78. Sprott, J. C., 2010. *Elegant chaos: algebraically simple chaotic flows*, World Scientific.
79. Pisarchik, A. N. ve Feudel, U., 2014. Control of multistability, *Physics Reports*, 540, 4, 167-218.
80. Pyragas, K., 1992. Continuous control of chaos by self-controlling feedback, *Physics Letters A*, 170, 6, 421-428.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Harun ÖZKURT

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 2018-2022

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Nanoteknoloji Anabilim Dalı, 2023-2025

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Bildiriler

1. Ozkurt, H., Sari, F., Taner, T., ve Dalkılıç, A. S., 2024. Impact of optimization on two-state piezoelectric materials, 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2024), Istanbul, s. 574-581.