

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİFT ANKASTRE KİRİŞLİ, MANYETİK UÇ KÜTLELİ PİEZOELEKTRİK
ENERJİ HASADI TASARIMI**

UMUT GÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. SİNAN BAŞARAN

BİLECİK, 2025

10761716

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİFT ANKASTRE KİRİŞLİ, MANYETİK UÇ KÜTLELİ PİEZOELEKTRİK
ENERJİ HASADI TASARIMI**

UMUT GÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŐMANI
DOÇ. DR. SİNAN BAŞARAN

BİLECİK, 2025

10761716

BEYAN

Çift Ankastre Kirişli, Manyetik Uç Kütleli Piezoelektrik Enerji Hasadı Tasarımı adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığımı, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.	
DESTEK ALINMIŞTIR	DESTEK ALINMAMIŞTIR
Destek alındı ise;	
Destekleyen kurum;	
Desteğin Türü	Proje Numarası
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	
2- TÜBİTAK	
Diğer;.....	
ETİK KURUL onayı var ise;	
ETİK KURUL karar tarih/sayı:/.....

Umut GÜR

.../.../2025

İmza

ÖNSÖZ

Bu çalışma, çift ankastre kirişli manyetik uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı tasarımı konusunu ele almakta olup, alanında yapılan mevcut araştırmaları derinlemesine inceleyerek özgün katkılar sunmayı hedeflemektedir. Tez süreci boyunca edindiğim bilgi ve deneyimler, akademik gelişimime önemli katkılar sağlamıştır.

Bu sürecin başarılı bir şekilde tamamlanmasında desteklerini esirgemeyen başta tez danışmanım Doç. Dr. SİNAN BAŞARAN'a olmak üzere, değerli bilgi ve yönlendirmeleriyle yol gösteren tüm akademisyenlere minnettarım. Benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan sevgili anneme ve babama teşekkürü bir borç bilirim. Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmam sırasında da benden hiçbir desteğini esirgemeyen kıymetli eşim Kübra GÜR'e sonsuz teşekkür ederim.

Bilimsel düşünceye katkı sağlaması dileğiyle...

Umut GÜR

2025

ÖZET

ÇİFT ANKASTRE KİRİŞLİ, MANYETİK UÇ KÜTLELİ PIEZOELEKTRİK ENERJİ HASADI TASARIMI

Bu tezde, çift ankastre kirişli manyetik uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sisteminin tasarımı ve deneysel analizi üzerinde durulacaktır. Piezoelektrik malzemeler, mekanik gerilim uygulandığında elektriksel bir gerilim üreten, ya da tersi olarak elektriksel bir alan uygulandığında mekanik deformasyona uğrayan malzemelerdir. "Piezo" kelimesi Yunanca "sıkıştırmak" veya "basınç uygulamak" anlamına gelir ve piezoelektrik etkisinin temel prensibini ifade eder. Bu malzemeler, çevresel değişikliklere duyarlı olup, enerji dönüşümünü sağlamak için kullanılırlar. Piezoelektrik etkisi, piezoelektrik malzemenin iç yapısındaki simetrisinin, dışarıdan bir kuvvet veya elektriksel alan uygulandığında değişmesiyle ortaya çıkar. Bu değişiklik, malzemenin atomik yapısındaki yük dağılımını etkiler ve dışı doğru elektriksel bir sinyal olarak ölçülebilir. Piezoelektrik malzemelerle enerji üretimi, batarya ve pil kirliliğini önlemek ve pahalı pil üretimi yerine mekanik titreşim yoluyla enerji elde etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Piezoelektrik malzemeler yüksek çalışma frekansına sahip olup, son yıllarda popüler araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, piezoelektrik yamalar, birbirine dik olacak şekilde yerleştirilmiş iki ankastre kirişe yapıştırılmıştır. Kirişlerin uçlarına mıknatıslar yerleştirilmiş ve kirişlerden birine dik olarak hava verilmiştir. Hava, belirli aralıklarla kapalı ve açık olacak şekilde Arduino ile programlanmıştır. Yapılan çeşitli denemeler sonucunda en ideal süre belirlenmiştir. İdeal süre olan 0.3 saniye açık ve 0.3 saniye kapalı durumda hava üflenirken, kirişlerin titreşimleri ve elde edilen voltaj değerleri incelenmiştir. Ayrıca, sistemin rüzgar gülü gibi bir düzenekle incelenebilmesi amacıyla bir DC motor kullanılarak motora bağlı milin dönmesi sağlanarak mil ucundaki mıknatıs ile kirişlerin uç kısmında yerleştirilmiş olan mıknatıslar etkileşime girerek kirişlerin titreşimleri ve piezoelektrik yamalardan elde edilen voltaj değerleri araştırılmıştır. Sistemin çalışması iki farklı deney düzeneği ile incelenmiş olup yapılan çalışmalar sonlu elemanlar analizi programıyla da simüle edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çift kiriş, Enerji hasadı, Manyetik dipol, Piezoelektrik.

ABSTRACT

DESIGN OF A PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING SYSTEM WITH PERPENDICULAR MAGNETIC COUPLING DOUBLE BEAMS

This thesis focuses on the design and experimental analysis of a piezoelectric energy harvesting system with a double anchored beam and magnetic end masses. Piezoelectric materials generate an electrical voltage when mechanical stress is applied, or conversely, they undergo mechanical deformation when an electrical field is applied. The term "piezo" comes from the Greek word meaning "to press" or "to apply pressure," which reflects the fundamental principle of the piezoelectric effect. These materials are sensitive to environmental changes and are used to facilitate energy conversion. The piezoelectric effect occurs when the symmetry of the piezoelectric material's internal structure changes upon the application of an external force or electric field. This change affects the atomic charge distribution of the material and can be measured as an outward electrical signal. Energy generation using piezoelectric materials is a widely used method to prevent battery and cell pollution, and to obtain energy through mechanical vibrations instead of relying on expensive battery production. Piezoelectric materials have high operating frequencies and have become popular research topics in recent years. In this study, piezoelectric patches were bonded to two cantilever beams placed perpendicularly to each other. Magnets were attached to the free ends of the beams, and air was blown perpendicularly to one of the beams. The air flow was controlled using Arduino, programmed to switch on and off at specific intervals. Through a series of trials, the optimal interval was determined. During the optimal condition of 0.3 seconds on and 0.3 seconds off, the vibrations of the beams and the voltage values generated were examined. Furthermore, in order to investigate the system in a setup resembling a wind turbine, a DC motor was used to rotate a shaft. The magnet attached to the end of the shaft interacted with the magnets placed at the free ends of the beams, and the resulting vibrations as well as the voltage values obtained from the piezoelectric patches were analyzed. The operation of the system was examined using two different experimental setups, and the studies were also simulated through a finite element analysis program setups, and the studies were also simulated using a finite element analysis program.

Key words: Double beams, Energy harvesting, Magnetic coupling, Piezoelectric.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2. Piezoelektrik Enerji Hasadı	3
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Enerji İhtiyacının Artması.....	5
2.2. Mikro Ölçekte Enerji Hasadının Önemi	6
2.3. Piezoelektrik Malzemeler.....	7
2.4. Piezoelektrik Etkisi	8
2.5. Enerji Hasadı Sistemleri	9
3.ENERJİ HASADININ ÖNEMİ VE GELECEĞİ.....	20
3.1.Türkiye'nin Yıllık Enerji Tüketimi ve Enerji İhtiyacı	21
3.2. Küresel Enerji İhtiyacı.....	22
4.METHOD	24
4.1. Lagrange Hareket Denkleminin Tanıtımı	25
4.2. Matematik Model	26
4.3. Deneysel Modelleme	33
5. SONLU ELEMEANLAR ANALİZİ.....	37

5.1. Deneysel Kuvvet Ölçümü	45
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	47
6.1. Pnömatik Hava Üfleme Uyarımı Deneysel Sonuçları	48
6.2 Çok Yönlü Hava Akışı Uyarımı Deneysel Sonuçları.....	57
6.3. Önerilen Çalışmanın Uygulaması.....	61
7.SONUÇ.....	65
KAYNAKÇA	67

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Dik manyetik bağlamalı çift kırıklı enerji hasadı sistemi parametreleri	32
Tablo 6.1. Farklı çevrim sürelerine göre kırış yer değiştirmeleri ve hasat edilen gerilim değerlerinin RMS (Kök ortalama kare) karşılaştırması	53

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Piezoelektrik yamalar	7
Şekil 2.2. Kiriş üzerine uygulanan dik yöndeki kuvvetler sayesinde gerçekleştirilen enerji hasadı	10
Şekil 2.3. Kiriş piezoelektrik yama enerji hasadı düzeneği	11
Şekil 2.4. PZT dizilimi ve piezoelektrik enerji hasat devresi	12
Şekil 2.5. İnsan ayak basışıyla çalışan enerji hasadı düzeneği	13
Şekil 2.6. Kiriş ve sabit mıknatıslar ile oluşturulmuş enerji hasadı düzeneği	14
Şekil 2.7. Piezoelektrik enerji toplayıcıların manyetik kuvvetle frekans ayarı üzerine yapılan araştırmanın deney düzeneği	15
Şekil 2.8. Titreşimli manyetik alan ile gerçekleştirilen enerji hasadı sistemi	15
Şekil 2.9. Sistemin şematik gösterimi	16
Şekil 2.10. Deneysel gösterim	17
Şekil 2.11. Önerilen HEH'in konfigürasyonu. (a) Kavramsal diyagram ve (b) Üstten görünüm	18
Şekil 3.1. Türkiye elektrik tüketimi (TEİAŞ)	22
Şekil 4.1. Deney düzeneği	25
Şekil 4.2. Manyetik uç kütleli ankastre kirişli enerji hasadı sistemi şematik gösterimi	27
Şekil 4.3. Kirişler üzerindeki yer değiştirme	28
Şekil 4.4. Önerilen sistemin deneysel düzeneği	33
Şekil 4.5. Rüzgar yönünden bağımsız kavramsal enerji hasadı sistemi	34
Şekil 4.6. Dönen manyetik uyarımlı deneysel düzenek	35
Şekil 5.1. Enerji hasadı sistemine ait üst görünüm: sabit mıknatısların yerleşimi ve manyetik kutuplaşma yönleri	38
Şekil 5.2. Önerilen sistemin manyetik sonlu elemanlar yöntemi analizi	39

Şekil 5.3. Kiriş-2 üzerinde etkili manyetik kuvvet	40
Şekil 5.4. Savonius tipi bir rüzgâr türbini ile çalışan enerji hasadı sisteminin şematik gösterimi	41
Şekil 5.5. Döner manyetik kuvvet durumuna ilişkin sonlu elemanlar yöntemi manyetik analiz modeli	43
Şekil 5.6. Kiriş-1 ve Kiriş-2 üzerinde etkili döner manyetik kuvvetler	44
Şekil 5.7. Deneysel kuvvet ölçümü için kullanılan düzeneğin şematik görünüşü	46
Şekil 6.1. Pnömatik hava üfleme mekanizmasının şematik gösterimi	49
Şekil 6.2. Çevrim zamanının gösterimi	50
Şekil 6.3. Darbe genişliği ve boşluk genişliği sürelerinin belirlenmesi: (a) Kiriş-1 (b) Kiriş-2.....	50
Şekil 6.4. Sistemin yer değiştirme sonuçları	52
Şekil 6.5. Sistemin piezoelektrik voltaj üretimi	52
Şekil 6.6. Hava üfleme yönüne göre kirişler tarafından elde edilen RMS gerilim değerlerindeki değişim	55
Şekil 6.7. Farklı elektriksel yük durumlarında, hava üfleme yönünün piezoelektrik enerji üretimindeki değişime etkisi	56
Şekil 6.8. Farklı rotor devir hızlarında kirişlerin yer değiştirme davranışı	59
Şekil 6.9. Rotor tabanlı manyetik uyarım durumunda piezoelektrik elemanlardan elde edilen gerilim çıkışları	60
Şekil 6.10. Farklı elektrik yükleri altında dönme hızının piezoelektrik enerji hasadı gücüne etkisi	61
Şekil 6.11. Farklı kapasitör tiplerinin şarj hızları	62
Şekil 6.12. Önerilen enerji hasadı sistemi için farklı uygulama örnekleri	64

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

$\dot{\vec{r}}_1$: 1. Konum Vektörü Türevi

$\dot{\vec{r}}_2$: 2. Konum Vektörü Türevi

\vec{r}_1 : 1. Konum Vektörü

\vec{r}_2 : 2. Konum Vektörü

F_y : Y Yönündeki Kuvvet

F_z : Z Yönündeki Kuvvet

M_{mag} : Kalıcı Miknatısların Etkileşimi Sonucu Oluşan Manyetik Kuplaj Torku

M_0 : Aerodinamik Momentin Genliği

$Q_{\theta_i}^{Pzt}$: Mekanik Sisteme Uygulanan Tork

$Q_{\theta_1}^{aero}$: Kiriş-1'e Uygulanan Dış Moment

Q_i : i-inci Koordinata Karşılık Gelen Genelleştirilmiş Dış Kuvvet

a_i : Elektromekanik Bağlaşım Katsayısı

c_{Pzt} : Piezoelektrik Plakanın Eşdeğer Kapasitansı

h_b : Yükseklik

o_{xy} : Tabana Sabitlenmiş Koordinat Sistemi

q_i : Yük

t_p : Piezoelektrik katman kalınlığı

t_s : Alt Taban Kalınlığı

v_i : Çıkış Gerilimi

$w_x(t)$: Yatay Yöndeki Deplasman

$w_y(t)$: Dikey Yöndeki Deplasman

μF : Mikrofarad

AC: Alternatif Akım

B: Genişlik

DC: Doğru Akım

FEA: Sonlu Elemanlar Analizi

FEMM: Sonlu Elemanlar Yöntemi Manyetiği

g: Yerçekimi İvmesi

HEH: Hibrit Enerji Hasadı

hpzt: Piezoelektrik Malzemenin Kalınlığı

IoT: Nesnelerin İnterneti

L: Uzunluk

m: Kütle

MEMS: Mikro Elektromekanik Sistem

mW: Miliwatt

N: Mıknatıs Kuzey Kutbu

PZT: Piezoelektrik

R: Direnç Yüğü

RMS: Kök Ortalama Kare

S: Mıknatıs Güney Kutbu

T: Kinetik Enerji

TWh: Terawatt-saat

U: Potansiyel Enerji

V: Gerilim

PEH: Piezoelektrik Enerji Hasadı

Tc: Çevrim Zamanı

Tp: Valfin Açık Kaldığı Süre

Ts: Valfin Kapalı Kaldığı Süre

bpzt: Piezoelektrik Malzemenin Uzunluğu

ddpm: Çapraz Mıknatıslanmış Silindirik Kalıcı Mıknatısın Çapı

ls: Taban İle Lazer Sensörü Ölçüm Noktaları Arasındaki Mesafe

ldpm: Çapraz Mıknatıslanmış Silindirik Kalıcı Mıknatısın Yüksekliği

lp: Taban İle PZT Yamalar Arasındaki Mesafe

lpm: Mıknatıs Uzunluğu

lpzt: Piezoelektrik Malzemenin Uzunluğu

t: Kiriş Kalınlığı

tpm: Mıknatıs Kalınlığı

w: Kiriş Genişliği

wpm: Miknatis Genişliği

EJ: Exajoule

J: Kütle Atalet Momenti

k: Yay Sönüm Katsayısı

kΩ: Kilo Ohm

l: Kiriş Uzunluğu

rpm: Dakikadaki Devir Sayısı

1.GİRİŞ

Enerji, iş yapabilme kapasitesine sahip bir fiziksel büyüklük olarak tanımlanmaktadır. Maddelerin hareketi, ışık, ısı, elektrik vb. farklı şekillerde doğada bulunabilir. Enerji doğal süreçler ve insan faaliyetleri ile sürekli olarak dönüşüm geçirir. Bu dönüşüm termodinamiğin birinci yasasına göre korunur. Yani enerji yoktan var edilemez, vardan da yok edilmez. Enerjinin temel formları arasında kimyasal enerji, mekanik enerji, elektrik enerjisi, termal ve nükleer enerji yer almaktadır.

Enerji günümüzde toplumların refah seviyelerini artırmak için önemli rol oynamaktadır. Bu enerjinin elde edilebilmesi için enerji, farklı sistemler kullanılarak dönüştürülüp kullanılabilir hale getirilmektedir. Son zamanlarda nesnelerin interneti (Internet of Things) kavramıyla pillerin üretilmesi ve bu teknolojiyi kullanan ürünlerin enerjilerinin sağlanması sorun teşkil etmeye başlamıştır. Teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte, özellikle kablosuz sensör ağları, taşınabilir elektronik cihazlar, medikal implantlar ve endüstriyel izleme sistemleri gibi alanlarda enerji gereksinimi giderek artmaktadır. Bu cihazların çoğu, enerji ihtiyaçlarını karşılamak için geleneksel batarya sistemlerine bağımlıdır. Ancak bataryaların sınırlı kapasitesi, bakım gereksinimleri ve çevresel etkileri, uzun vadede sürdürülebilir bir çözüm olmaktan uzak kalmaktadır. Bu doğrultuda, çevresel enerji kaynaklarından yararlanarak enerji ihtiyacını karşılayan enerji hasadı (energy harvesting) teknolojileri, araştırmacıların ve endüstrinin yoğun ilgisini çekmektedir.

Enerji hasadı sistemleri; çevrede bulunan ışık, ısı, elektromanyetik dalgalar ve mekanik titreşim gibi enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretmeyi amaçlar. Mekanik titreşim enerjisinin hasadı, özellikle pek çok endüstriyel ve doğal ortamda yaygın olarak bulunan titreşimlerin değerlendirilmesine olanak tanınması sebebiyle önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu alanda, piezoelektrik malzemelerin mekanik enerjiye karşı duyarlı yapısı, yüksek enerji dönüşüm verimliliği ile birlikte sistem tasarımında öne çıkmaktadır. Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri, titreşim enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde basit ve etkili bir yöntem sunar. Geleneksel olarak bu sistemler, tek tarafı sabitlenmiş (konsol) kirişler üzerine yerleştirilen piezoelektrik elemanlar kullanılarak tasarlanmıştır. Manyetik uç kütlelerin kullanımı, sistemin dinamik davranışını zenginleştirerek hem düşük hem de yüksek frekanslarda verimli enerji üretimine olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, manyetik kuvvetlerin

ve doğrusal olmayan mekanik elemanların entegrasyonu, günümüz enerji hasadı teknolojilerinin gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, çift ankastre kirişli, manyetik uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sisteminin tasarımını yapmak, sistemin dinamik davranışını matematiksel modelleme yoluyla incelemek ve simülasyonlarla analiz etmektir. Çalışmada, piezoelektrik malzemelerin mekanik titreşimlere verdiği tepki, kirişin rijitliği, manyetik kuvvetlerin etkisi ve sistemin rezonans frekansları detaylı olarak değerlendirilecektir. Böylelikle, sistemin enerji dönüşüm verimliliği artırılmaya çalışılacak ve mevcut enerji hasadı teknolojilerine katkı sağlanacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, yenilikçi bir enerji hasadı sistemi tasarımı sunarak, çevresel titreşimlerden elde edilen enerji miktarının artırılması ve enerji hasadı sistemlerinin çalışma bant genişliğinin genişletilmesine yönelik önemli bir araştırma olacaktır. Ayrıca, tasarlanan sistemin teorik ve sayısal analizleri, gelecekteki deneysel çalışmalar ve uygulama alanları için sağlam bir temel oluşturacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımını desteklemek adına geliştirilen mikro ölçekte enerji hasadı sistemlerinin işlevselliğini ve potansiyel uygulama alanlarını incelemektir. Günümüzde artan enerji talebi, çevresel kaygılar ve taşınabilir elektronik cihazların yaygınlaşması, düşük güçlü ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle sensör teknolojileri, kablosuz iletişim sistemleri ve IoT (Nesnelerin İnterneti) uygulamaları gibi alanlarda, enerjiye olan ihtiyaç sürekli artmakta ve bu ihtiyaçlar çoğunlukla düşük seviyeli, sürekli enerji gereksinimlerini kapsamaktadır.

Bu bağlamda tez, yön bağımsız çalışabilen, piezoelektrik temelli bir enerji hasadı mekanizmasının deneysel ve analitik temellere dayalı olarak değerlendirilmesini hedeflemektedir. Sistemin hem mekanik hem de manyetik etkileşimler yoluyla enerji üretme kapasitesinin anlaşılması ve pratik uygulamalara uygunluğunun test edilmesi, bu çalışmanın merkezinde yer almaktadır. Özellikle sistemin düşük yoğunluklu çevresel titreşimlerden enerji elde edebilme yeteneği, mikro ölçekte enerji üreten cihazların geliştirilmesine yönelik önemli bir adımdır. Ayrıca bu tezde, geliştirilen sistemin rüzgâr yönünden bağımsız olarak çalışabilmesi sayesinde, çevresel koşullardan etkilenmeyen, daha kararlı bir enerji üretim

altyapısı sunulması amaçlanmaktadır. Bu özellik, sistemin sürdürülebilirliğini ve farklı coğrafi koşullarda uygulanabilirliğini artırarak, enerji altyapısının daha erişilebilir ve verimli hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmanın amacı, düşük güçlü, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesine katkı sunmak, mikro ölçekte enerji üretiminin mühendislik uygulamalarındaki yerini somutlaştırmak ve gelecekteki benzer sistemler için bilimsel bir temel oluşturmaktır.

1.2. Piezoelektrik Enerji Hasadı

Enerji hasadı teknolojileri arasında, piezoelektrik prensibe dayalı sistemler; özellikle yapısal titreşimlerin yaygın olduğu ortamlarda pasif ve uzun ömürlü çözümler sunmaları bakımından öne çıkmaktadır. Piezoelektrik enerji hasadı, belirli malzemelerin üzerine uygulanan mekanik gerilme ya da titreşim sonucunda, bu malzemelerin yüzeylerinde oluşan elektriksel yüklerin toplanmasıyla elektrik enerjisi elde edilmesi sürecini ifade eder. Bu yöntem, çevresel titreşimlerin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde verimli ve kompakt bir alternatif sunar.

Piezoelektrik hasat sistemleri genellikle bir kiriş yapısı üzerine entegre edilmiş piezoelektrik malzemelerden oluşur. Bu malzemeler, dışarıdan gelen dinamik yükler (örneğin; adım, motor titreşimi, makine hareketleri, rüzgâr türbülansları) ile deforme olduklarında, iç yapılarındaki elektrik dipollerinin yönlenmesiyle birlikte yüzeylerinde ölçülebilir bir gerilim oluştururlar. Bu gerilim, uygun devre elemanları aracılığıyla enerjiye dönüştürülüp depolanabilir ya da doğrudan düşük güçlü bir devreyi beslemede kullanılabilir. Piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin performansı; kullanılan piezoelektrik malzemenin özelliklerine (örneğin: piezoelektrik sabitleri, dielektrik katsayısı, mekanik dayanım), sistemin geometrisine (örneğin: kiriş tipi, rezonans frekansı, kütle yerleşimi), çevresel koşullara ve yükleme frekansına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Sonuç olarak, piezoelektrik enerji hasadı; mobilite gerektiren, güç altyapısının sınırlı olduğu veya enerji bakımının zor olduğu alanlarda alternatif enerji kaynağı sunmakta ve geleceğin düşük güçlü, otonom sistemlerine yönelik sürdürülebilir çözümlerin temelini oluşturmaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Günümüzde düşük güçlü elektronik cihazların ve kablosuz sensör ağlarının kullanımının artması, bu sistemlerin uzun süreli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışabilmesi için alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Geleneksel kimyasal pillerin sınırlı ömrü, bakım gereksinimi ve çevresel etkileri nedeniyle bu tür sistemlerde enerji ihtiyacını karşılamak için çevresel enerji kaynaklarının dönüştürülerek kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, çevrede yaygın olarak bulunan mekanik titreşimlerin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan piezoelektrik enerji hasat sistemleri önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Enerji hasadı; titreşim, ısı, ışık, sıcaklık, hava akımı vb. gibi farklı enerji kaynaklarından elde edilen ve ortam enerjisini kullanıp elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından, özellikle mekanik titreşimlerden enerji hasadı, geleneksel pillerin yerini almak veya ömürlerini uzatmak için umut verici bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Siddique vd., 2015). Akıllı şehirler, akıllı ulaşım sistemleri ve akıllı izleme teknolojilerine olan talebin artmasıyla birlikte, kablosuz sensör ağları cazip bir hedef haline gelmiştir (Zuo vd., 2023). Titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla çeşitli titreşim enerjisi toplayıcıları tasarlanmıştır (Saadon ve Sidek, 2011). Enerji dönüşüm mekanizmaları arasında, basit yapıları, yüksek güç yoğunlukları ve verimlilikleri sayesinde piezoelektrik enerji toplayıcılar araştırmacıların yoğun ilgisini çekmiştir (Wu vd., 2021), (Liv d., 2022). Güneş (Raghunathan vd., 2005), (Brunelli vd., 2009), rüzgâr (Zheng vd., 2023), (Wen vd., 2021), okyanus dalgaları (Khan vd., 2016), (Collins vd., 2021) ve titreşim (Tran vd., 2018), (Mohanty vd., 2019) enerjileri, küçük ölçekli enerji toplama için umut verici kaynaklar olarak geniş bir şekilde incelenmiştir. Günümüzde kablosuz sensör ağları, Nesnelerin İnterneti uygulamaları ve otonom sistemlerdeki gelişmeler, düşük güçlü ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda, çevresel titreşimlerden enerji toplayarak elektronik sistemleri beslemeye yönelik piezoelektrik enerji hasadı sistemleri büyük ilgi görmektedir. Piezoelektrik enerji toplayıcılar, basit yapıları ve yüksek güç yoğunlukları sayesinde öne çıkarken, düşük frekanslı ve geniş bantlı ortam koşullarında verimli çalışabilmeleri için yapısal yeniliklere ihtiyaç duymaktadır.

Bu tez çalışmasında, çift ankastre kirişten oluşan ve birbirine dik konumlandırılmış uç kısımlarda yer alan sabit mıknatıslar aracılığıyla manyetik olarak etkileşen yeni bir piezoelektrik enerji hasat sistemi sunulmaktadır. Önerilen yapı, yön bağımsız enerji toplama

yeteneği ile geleneksel sistemlerden ayrılmakta ve manyetik bağlanma sayesinde, yalnızca bir kirişin uyarılması durumunda dahi her iki kirişten eşzamanlı enerji üretimi sağlamaktadır. Yapılan çalışma için deneysel bir model oluşturulmuş olup sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır. Bu çalışma kapsamında ise sistemde kiriş uçlarına yerleştirilmiş olan sabit mıknatısların etkileşim kuvvetlerinin tespiti sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilerek deneysel çalışma ile kıyaslanacaktır. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin düşük güçlü elektronik cihazları besleyebilecek düzeyde enerji üretme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymakta ve bu yapının gerçek dünya uygulamaları için güçlü bir aday olduğunu göstermektedir.

2.1. Enerji İhtiyacının Artması

Günümüzde dünya genelinde enerjiye duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu artışın temel nedenleri arasında nüfusun büyümesi, kentleşmenin hızlanması, yaşam standartlarının yükselmesi ve teknolojik cihazların günlük yaşamdaki kullanımının yaygınlaşması yer almaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki sanayileşme ve altyapı gelişimi, enerji tüketimini ciddi biçimde artırmaktadır.

Enerji, yalnızca konutlarda aydınlatma, ısınma veya ulaşım gibi temel ihtiyaçlar için değil, aynı zamanda sağlık, eğitim, iletişim ve üretim gibi toplumun her alanında vazgeçilmez bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle artan enerji talebi, yalnızca bir tüketim meselesi değil; aynı zamanda ekonomik kalkınma, çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal refah açısından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Enerjiye olan bu artan talep, mevcut enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını ve yeni, yenilenebilir kaynaklara yönelimi zorunlu kılmaktadır. Aynı zamanda, bireysel ölçekte de düşük güçlü sistemler ve taşınabilir teknolojiler için bağımsız enerji çözümlerine olan ihtiyaç dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, enerji üretiminin yalnızca büyük ölçekli santrallerle değil, yerel ve çevresel kaynakları değerlendiren küçük ölçekli sistemlerle desteklenmesi, gelecekte sürdürülebilir bir enerji altyapısının inşası açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, enerji ihtiyacındaki bu artış, tüm dünyada enerji politikalarının, teknolojik yatırımların ve akademik araştırmaların merkezinde yer almakta; yeni çözüm arayışlarını ve yenilikçi sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu süreçte, toplumların enerjiye erişimini güvence altına alacak, çevreyle uyumlu, ekonomik ve sürdürülebilir çözümlere duyulan ihtiyaç her zamankinden daha fazladır.

2.2. Mikro Ölçekte Enerji Hasadının Önemi

Günümüz teknolojisinin gelişimiyle birlikte düşük güçlü elektronik cihazların, sensörlerin ve gömülü sistemlerin kullanımı hızla artmıştır. Bu tür sistemler, özellikle kablosuz haberleşme ağları, sağlık izleme sistemleri, çevresel gözlem istasyonları ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin verimli ve sürekli çalışabilmesi için güvenilir bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, mikro ölçekte enerji hasadı (micro-scale energy harvesting) kavramı önem kazanmıştır.

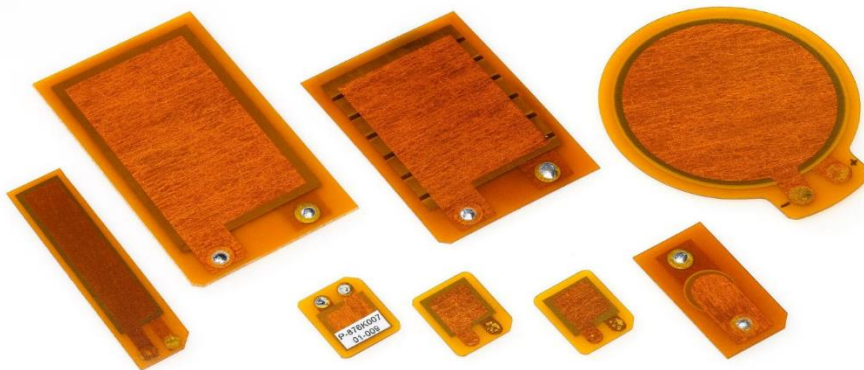
Mikro ölçekte enerji hasadı, çevresel kaynaklardan elde edilen düşük seviyeli mekanik, termal, ışık veya elektromanyetik enerjinin küçük elektronik sistemlerde kullanılabilen elektrik enerjisine dönüştürülmesini ifade eder. Bu yöntem sayesinde, özellikle pil değişimi veya kablolu enerji iletimi gibi zorlukların bulunduğu alanlarda, sistemlerin kendi kendine enerji üretebilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu durum, bakım maliyetlerini azaltmakta ve sistemin çalışabilirliğini artırmaktadır. Özellikle ulaşılması zor veya izole bölgelerde bulunan sensör sistemleri için mikro ölçekte enerji hasadı büyük bir avantaj sağlamaktadır. Örneğin, tarım arazilerindeki nem sensörleri, bina içi hava kalitesi izleme sistemleri ya da insan vücuduna yerleştirilen biyosensörler, sürekli veri toplayabilmek için enerjiye ihtiyaç duyar. Bu sistemlerde enerji hasadı, hem çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte hem de cihazların ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır.

Bununla birlikte, mikro ölçekte enerji hasadına dayalı sistemler, enerji arzında dışa bağımlılığı azaltmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Böylece, enerji verimliliği açısından yeni bir yaklaşım ortaya çıkmakta; enerji üretimi yalnızca büyük ölçekli santrallerden değil, bireysel ve yerel düzeyde de mümkün hale gelmektedir.

Sonuç olarak, mikro ölçekte enerji hasadı, düşük güçlü sistemlerin enerji ihtiyacını karşılamada sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Özellikle günümüzde nesnelerin interneti (IoT), akıllı şehirler ve giyilebilir teknolojiler gibi alanların gelişmesiyle birlikte bu yöntem, geleceğin enerji sistemlerinde kritik bir rol oynamaya adaydır.

2.3. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, mekanik gerilme altında elektriksel yük üretebilen, aynı şekilde elektriksel uyarım altında şekil değiştirebilen özel bir malzeme sınıfını temsil eder. Bu çift yönlü enerji dönüşüm özelliği, söz konusu malzemeleri hem sensör hem de aktüatör olarak kullanılabilir kılmaktadır. “Piezoelektrik” terimi, Yunanca “piezein” (basmak, sıkıştırmak) kelimesinden türemiş olup, bu malzemelerin kristal yapısındaki asimetriden kaynaklanan özgün bir fiziksel fenomeni ifade eder. İlk kez 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilen bu etki, günümüzde çeşitli mühendislik uygulamalarında yoğun biçimde kullanılmaktadır (Curie ve Curie, 1880). Piezoelektrik etki, bazı kristal yapıların dış mekanik kuvvetler altında elektrik dipol momentleri üretmesiyle ortaya çıkar. Bu kristaller, merkezlenmiş yük dağılımlarına sahiptir; dolayısıyla uygulanan mekanik gerilme, yapının içinde net bir elektrik alan oluşmasına neden olur. Bu özellik, doğrudan piezoelektrik etki olarak tanımlanırken, ters piezoelektrik etki ise elektrik alanın uygulanmasıyla kristalin mekanik deformasyona uğramasını ifade eder. Bu iki yönlü etki, enerji hasadı, titreşim sönümlenme, ultrasonik uygulamalar ve hassas konumlandırma sistemlerinde geniş bir kullanım alanı yaratmaktadır (Safari ve Akdoğan, 2008). Piezoelektrik malzemeler genel olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir: doğal ve sentetik piezoelektrikler. Doğal piezoelektrik malzemeler arasında kuvars, turmalin ve roşel tuzu gibi kristaller yer alırken; sentetik piezoelektrikler, genellikle seramik veya polimer temelli olarak üretilmektedir. En yaygın kullanılan sentetik piezoelektrik malzeme, kurşun zirkonat titanat olup, yüksek piezoelektrik katsayısı, kararlılığı ve geniş frekans tepkisi nedeniyle enerji hasadı sistemleri dahil birçok teknolojik uygulamada tercih edilmektedir (Uchino, 1997).



Şekil 2.1. Piezoelektrik yamalar
Kaynak: (PI Ceramic GmbH, P.I. Online 2025).

Mühendislik uygulamaları açısından bakıldığında, piezoelektrik malzemelerin (Şekil 2.1) en dikkat çeken kullanım alanlarından biri mekanik titreşimlerden enerji üretimidir. Özellikle düşük güçlü elektronik sistemlerde ve kablosuz sensör ağlarında, çevresel titreşimleri doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek batarya bağımlılığını azaltmak mümkündür. Bu malzemeler aynı zamanda mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS), biyomedikal cihazlar, akıllı yapılar, ultrasonik dönüştürücüler ve hassas kontrol sistemleri gibi alanlarda da vazgeçilmez bileşenler olarak yer almaktadır (Anton ve Sodano, 2007).

Sonuç olarak, piezoelektrik malzemeler, enerji dönüşüm özellikleri sayesinde çağdaş mühendislik çözümlerinde stratejik bir öneme sahiptir. Malzeme bilimi, mekanik sistem tasarımı ve elektronik kontrol teknolojileri arasındaki etkileşim, bu tür malzemelerin performansının ve uygulama alanlarının daha da genişletilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerle entegre edilen piezoelektrik elemanlar, gelecek nesil enerji hasadı sistemleri için umut verici çözümler sunmaktadır.

2.4. Piezoelektrik Etkisi

Piezoelektrik etki, belirli kristal yapılarına sahip malzemelerin mekanik enerji ile elektrik enerjisi arasında doğrudan dönüşüm gerçekleştirmesine olanak sağlayan özgün bir fiziksel olgudur. Bu etki, kristal yapıdaki yük merkezlerinin simetrik olmaması durumunda ortaya çıkar ve özellikle malzeme bilimi ile elektromekanik sistemler arasında köprü kuran kritik bir fenomen olarak değerlendirilir.

Piezoelektrik etkinin özünde, kristalin atomik düzeydeki düzenlenme biçimi yer alır. Merkezi simetriye sahip olmayan yapılar, dışsal bir stres (çekme, basma, bükme vb.) uygulandığında içsel dipol momentlerinde değişim yaratır. Bu değişim, yüklerin kristal düzlemlerinde yer değiştirmesiyle yüzeylerde elektrik potansiyelinin birikmesine yol açar. Bu bağlamda, piezoelektrik etki bir kristal asimetrisi sonucu ortaya çıkan kutuplaşma değişimi olarak yorumlanabilir. Ters piezoelektrik etki ise, uygulanan bir elektrik alanının kristalin fiziksel deformasyonuna neden olmasıdır. Bu etki özellikle mikro hareket gerektiren yüksek hassasiyetli uygulamalarda (örneğin, optik ayar sistemleri, mikro konumlandırıcılar) geniş kullanım alanı bulmaktadır. Piezoelektrik etkinin gözlemlenebilmesi için kristalin belirli özelliklere sahip olması gerekir. Bu özelliklerin başında piezoelektrik aktif kristal sınıfları gelir. Uluslararası Kristalografi Birliği tarafından belirlenen 32 kristal sınıfının 21'i piezoelektrik

özellik gösterir. Bu sınıflar arasında en çok bilinen ve kullanılanlar tetragonal ve rombohedral yapılarıdır.

Bilimsel ve teknolojik gelişmeler, piezoelektrik etkinin sadece seramik ve kristal yapıdaki malzemelerle sınırlı olmadığını, aynı zamanda polimerik yapılar ve hibrit malzeme sistemlerinde de işlevsel hale getirilebileceğini göstermektedir. Bu çeşitlilik, piezoelektrik etkinin farklı mekanik esneklik, frekans yanıtı ve termal kararlılık gibi parametreler doğrultusunda özelleştirilebilmesini sağlar. Piezoelektrik etki yalnızca bir enerji dönüşüm mekanizması değil, aynı zamanda malzeme bilimi, fizik, elektronik ve mekanik sistem tasarımı arasında çok disiplinli bir etkileşimin somut bir tezahürüdür. Enerji hasadı, titreşim kontrolü, sensör sistemleri ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda bu etkinin mühendislik açısından sunduğu olanaklar, sürdürülebilir ve entegre çözümlerin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Proje kapsamında ulusal ve uluslararası literatür taraması yapılmıştır. Yapılan literatür taramasıyla ilgili projenin farklılığı ve sunacağı avantajlar araştırılmıştır. Özellikle piezoelektrik malzemenin kullanılıp enerji hasadına olan katkısı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş olup, projenin uygulanabilirliği ve deneysel çalışmalar için ön bilgiler toplanmıştır. Enerji hasadı, çevremizdeki çeşitli kaynaklardan, özellikle âtıl durumda olan enerji biçimlerinden, küçük miktarlarda enerji toplama ve kullanma sürecidir. Bu süreç, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji yönetimi anlayışının önemli bir parçasıdır. Enerji hasadı, güneş, rüzgâr, termal ve mekanik enerjiyi toplayarak, düşük güçlü elektronik cihazlardan büyük ölçekli enerji sistemlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir hale getirmektedir.

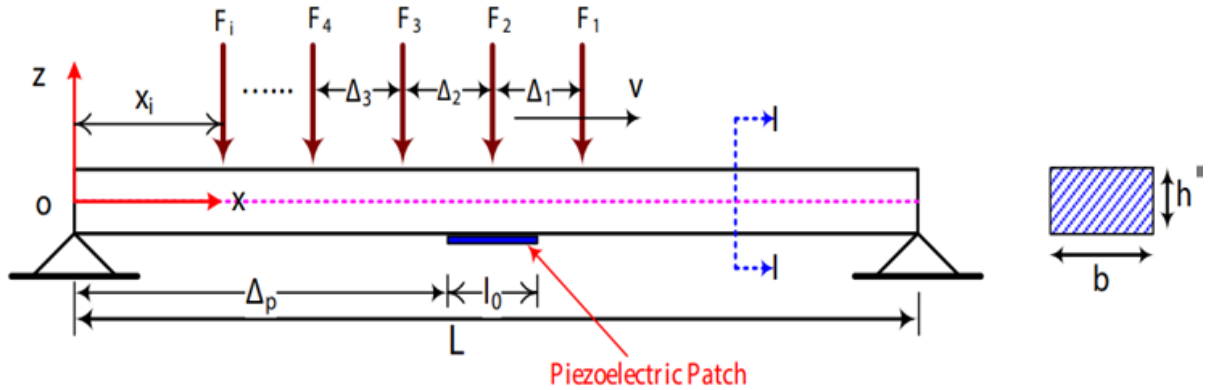
Enerji hasadı, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerjiye erişimin sınırlı olduğu bölgelerde de sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Tez konumuz, akademisyenler, mühendisler, enerji sektörü profesyonelleri ve politika yapımcılar için değerli bir kaynak olup, enerji hasadı konusundaki bilinçlenmeyi ve yenilikçi uygulamaların yaygınlaşmasını amaçlamaktadır.

2.5. Enerji Hasadı Sistemleri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür taramaları, enerji hasadı alanındaki temel fiziksel mekanizmalar, kullanılan malzeme türleri, yapısal tasarım parametreleri ve bu

sistemlerin performansını etkileyen faktörler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Özellikle son yıllarda yapılan araştırmalar, piezoelektrik malzemelerin düşük frekanslı çevresel titreşimlerden enerji elde etme potansiyeline dikkat çekmekte ve bu doğrultuda farklı geometrik yapılar ile hibrit çözümler önerilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen bulgular, bu tezin özgün tasarımını oluştururken bilimsel dayanak sağlamış ve araştırma boşluklarının tespit edilmesine katkı sunmuştur. Böylece mevcut bilgi birikimi temelinde, sistematik bir yaklaşım ile piezoelektrik enerji hasadı performansının artırılmasına yönelik yeni bir tasarım önerisinin gerekliliği ortaya konmuştur.

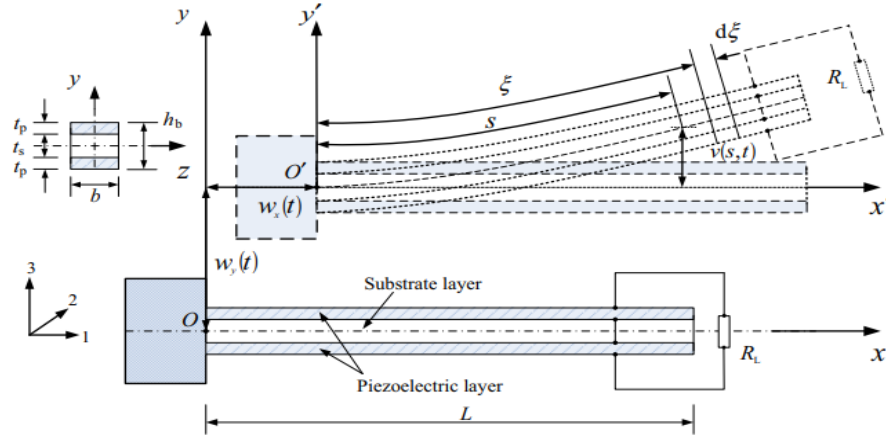
Piezoelektrik ile ilgili yapılan bir çalışmada kiriş iki ucundan sabitlenmiş olup alt kısmına piezoelektrik malzeme yapıştırılmıştır. Kiriş üzerine uygulanan kirişe dik yöndeki kuvvetler sayesinde piezoelektrik malzemedan enerji hasadı gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında kuvvetler kirişin farklı yönlerinde uygulanmıştır. Ayrıca kiriş kalınlıkları değiştirilerek kiriş kalınlığının elektrik üretimine etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. Açık bir şekilde kalınlığı azaltmanın daha çok enerji üretimi sağladığı gözlenmiştir (Amini vd., 2017).



Şekil 2.2. Kiriş üzerine uygulanan dik yöndeki kuvvetler sayesinde gerçekleştirilen enerji hasadı
Kaynak: (Amini vd., 2017).

Diğer bir yapılan araştırma da ise kiriş, bir alt tabaka ve iki piezoelektrik katmandan oluşmaktadır (Şekil 2.2). Piezoelektrik katmanlar, RL yük direncine bağlanmış ihmal edilebilir kalınlıkta iki düzlem elektrot tarafından sınırlanmıştır. Kiriş, uzunluğu L , genişliği b ve yüksekliği $h_b = t_s + 2t_p$ olan bir Euler-Bernoulli kirişi olarak ele alınırken, kesme deformasyonu ve dönme hareketi ihmal edilmektedir, t_s alt tabaka kalınlığını, t_p ise her bir piezoelektrik katmanın kalınlığını ifade eder. o_{xy} 'yi moment alma koordinat sistemi olarak

ayarlayarak, kirişin kelepçeli uç deplasmanları, sırasıyla yatay ve dikey yönde $w_x(t)$ ve $w_y(t)$ 'dir. o_{xy} , tabana sabitlenmiş koordinat sistemi olarak kabul edilir (tabanla birlikte hareket eder). Deney düzeneği aşağıdaki şemada (Şekil 2.3) belirtilmiştir (Fang vd., 2018).



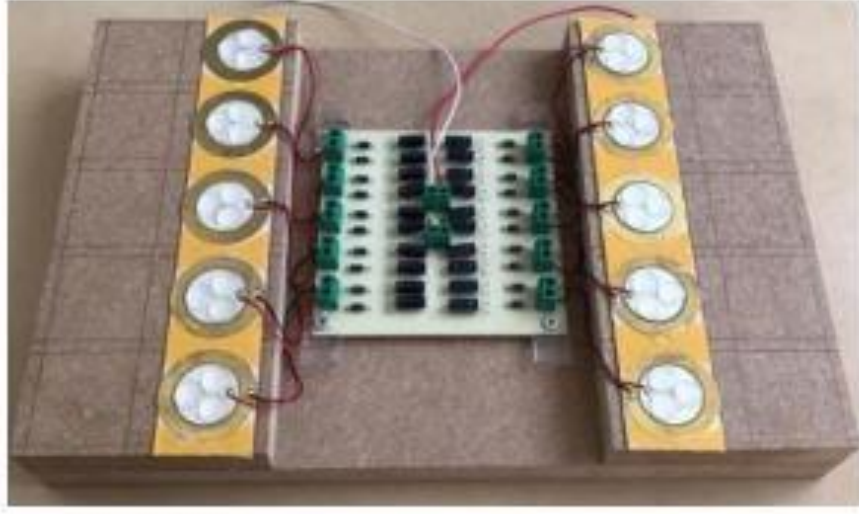
Şekil 2.3. Kiriş piezoelektrik yama enerji hasadı düzeneği
Kaynak: (Fang vd., 2018).

Bu çalışmada, dış ve parametrik uyarılar altında piezoelektrik kiriş enerji toplayıcılarının nonlinear dağıtılmış parametre modeli, genelleştirilmiş Hamilton prensibi kullanılarak geliştirilmiştir. Frekans-yanıt eğrilerinin analitik ifadeleri Galerkin yöntemi ve harmonik denge yöntemi kullanılarak sunulmuştur. Elde edilen ifadeleri kullanarak, sönümleme, yük direnci, elektromekanik kuplaj ve uyarı genliğinin frekans-yanıt eğrileri üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Ayrıca, enerji toplama sisteminin performansını tahmin etmek için nonlinear toplu parametre ve nonlinear dağıtılmış parametre modeli arasındaki farkı incelenmiştir.

Diğer bir araştırma konusu olarak piezoelektrik seramik dönüştürücü, maruz kaldığı bir darbenin veya titreşimin ivmesiyle orantılı bir voltaj üretir. Şok sensörü çarpma enerjisini orantılı bir elektrik sinyaline dönüştürmek için piezoelektrik seramik kullanır. Piezoelektrik şok sensörü, metal bir diske lamine edilmiş bir piezoelektrik seramik diskten oluşan "tek biçimli" bir diyafram kullanır. Darbe dalgası 1/2 sinüs dalgası iken çıkış voltajı, çarpmanın ivmesiyle neredeyse orantılıdır.

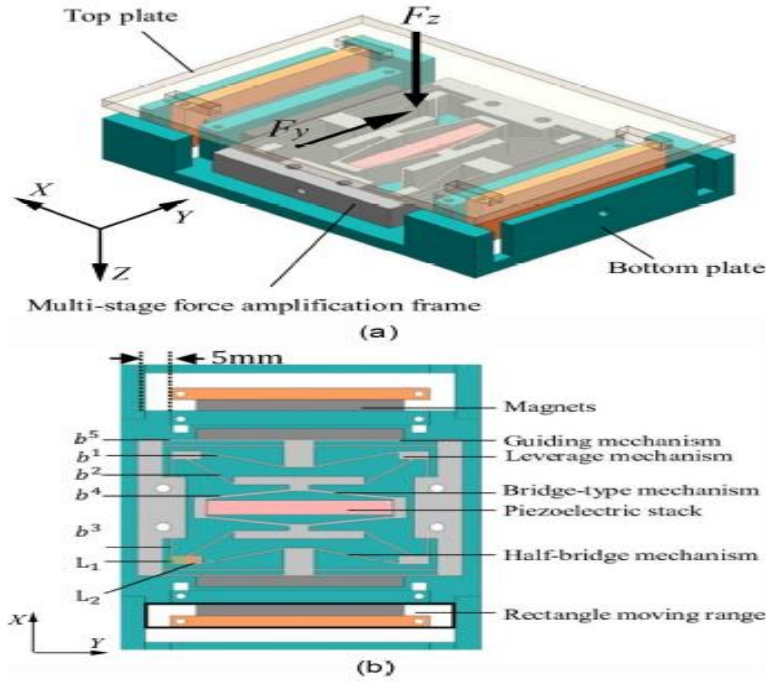
Deneyel çalışmada 10 adet 35 mm çapında piezoelektrik malzeme satın alınarak kullanılmıştır. Bunlardan 5 tanesi deney düzeneğinin 200 mm'lik kenarı boyunca eşit aralıklarla

dizilmiştir. 5 adet piezoelektrik malzeme ayrı ayrı 5 adet gerilim ikileyiciye bağlanmıştır ve 5 adet gerilim ikileyici birbirine seri olarak bağlanmıştır (Şekil 2.4). Sonunda bu iki devre paralel bağlanarak deney düzeneği elde edilmiştir. Ağırlıkları farklı dört birey, oluşturulan deney düzeneği üzerinde üç farklı hızda yürümüş ve enerji hasadı yapılmıştır. Anlık olarak üretilen maksimum gerilimlerde aynı bireyin adım hızı arttıkça hasat edilen gerilimin maksimum değerinin de arttığı görülmüştür. Aynı bireyin adım hızı arttıkça hasat edilen anlık gerilimlerin ortalama değerinin önemli ölçüde arttığı değerlendirilmiştir (Çavuş ve Oy, 2024).



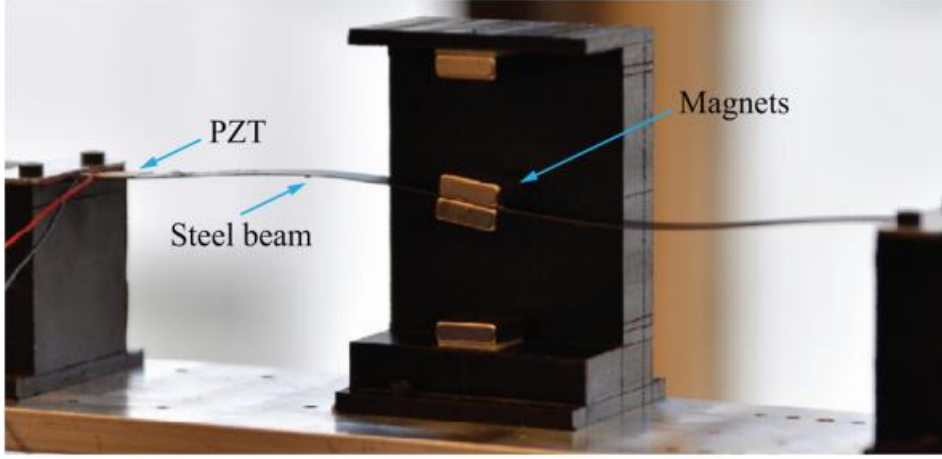
Şekil 2.4. PZT dizilimi ve piezoelektrik enerji hasat devresi
Kaynak:(Çavuş ve Oy, 2024).

Bir diğer çalışmada ise sunulan piezoelektrik yığın tabanlı enerji toplayıcısının çalışma prensibi çalışılmıştır. Üst plaka, insan ayak basışıyla uygulanan F_z veya F_y kuvvetinin giriş ucu olarak işlev görür (Şekil 2.5). Çalışma sürecinde, y ve z yönündeki uygulanan kuvvetler, dört kalıcı mıknatıs aracılığıyla x yönünde manyetik kuvvete dönüştürülür. Bu manyetik kuvvet, kuvvet amplifikasyon çerçevesi tarafından piezoelektrik yığın üzerine uygulanır ve ileri piezoelektrik etki yoluyla güç üretimine katkıda bulunur (Wen vd., 2019).



Şekil 2.5. İnsan ayak basışıyla çalışan enerji hasadı düzeneği
Kaynak: (Wen vd., 2019).

Yine bükülmüş bir kiriş üzerinden enerji hasadı üzerine yapılan çalışmada, bükülmüş kiriş enerji toplayıcısının ortasına temas etmeyen, doğrusal olmayan, itici bir manyetik kuvvet uygulanmaktadır. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, orta nokta manyetik kuvveti, kirişin ortasına iki mıknatıs bağlayarak ve toplayıcının çerçevesinin üst ve altına iki mıknatıs yerleştirilerek oluşturulmuştur. Mıknatısların manyetizasyon yönleri, orta mıknatısların her zaman üst ve alt mıknatıslar tarafından itildiği şekilde seçilmiştir; böylece D mesafesi ile bir manyetik levitasyon sistemi oluşturulmuştur. Bu nedenle, bükülmüş kiriş, anti simetrik ikinci bükülme modu nedeniyle iki kararlı denge durumuna ve simetrik birinci bükülme modu nedeniyle iki kararsız denge durumuna sahip olmuştur. Uyarıldığında, kiriş önce kararlı pozisyonu etrafında salınacak ve belirli koşullar altında kararlı veya kararsız denge durumları arasında geçiş yapacaktır (Zhu ve Zu, 2013).

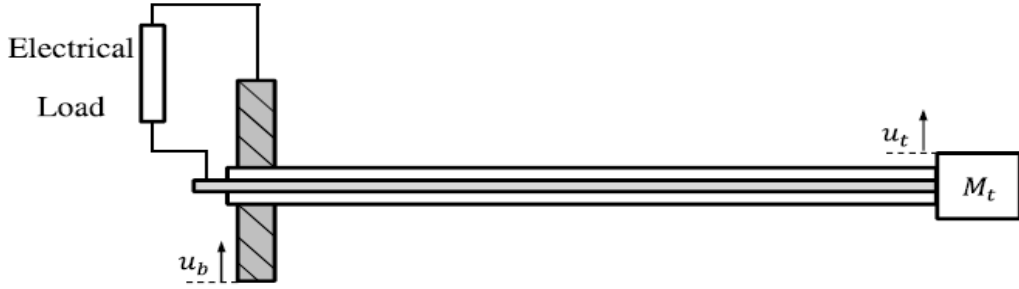


Şekil 2.6. Kiriş ve sabit mıknatıslar ile oluşturulmuş enerji hasadı düzeneği
Kaynak: (Zhu ve Zu, 2013).

Cottone ve arkadaşları (Cottone vd., 2009) tarafından Gauss rastgele uyarı altında simetrik bir, iki kararlı piezoelektrik kirişin stokastik yanıtı araştırılmıştır ve sonuçları, doğrusal olmayan iki kararlı toplayıcıların stokastik uyarı altında doğrusal olanlardan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Erturk (Erturk ve Inman, 2011), Stanton ve arkadaşları (Stanton vd., 2010), büyük genlikli periyodik salınımların titreşim enerjisini verimli bir şekilde toplamak için kullanılabilirliği manyetik bağlantılı iki kararlı bir yapı üzerinde incelemeler yapmışlardır. Zhou ve arkadaşları (Zhou vd., 2013), döndürülebilir mıknatıslar kullanarak doğrusal olmayan enerji toplayıcıların geniş bant performans artırımı sağlamışlardır. Deneysel sonuçları, iki kararlı toplayıcıların düşük uyarı seviyelerinde yeterli seviyede voltaj üretmediğini de göstermiştir. Cao ve arkadaşları (Cao vd., 2015), iki kararlı toplayıcıların dinamik yanıtları üzerindeki fraksiyonel sönümlenme, uyarı seviyesi ve uyarı frekansının etkisini analiz etmiştir. Düşük uyarı seviyelerine karşı enerji toplayıcılarının hassasiyetini artırmak amacıyla, Zhou ve arkadaşları (Zhou vd., 2014) daha sık potansiyel kuyulara sahip bir üç kararlı toplayıcıyı sayısal ve deneysel olarak incelemiş ve üç kararlı enerji toplayıcısının iki kararlı yapı ile karşılaştırıldığında daha iyi pratik olduğunu göstermiştir (Zhou vd., 2015).

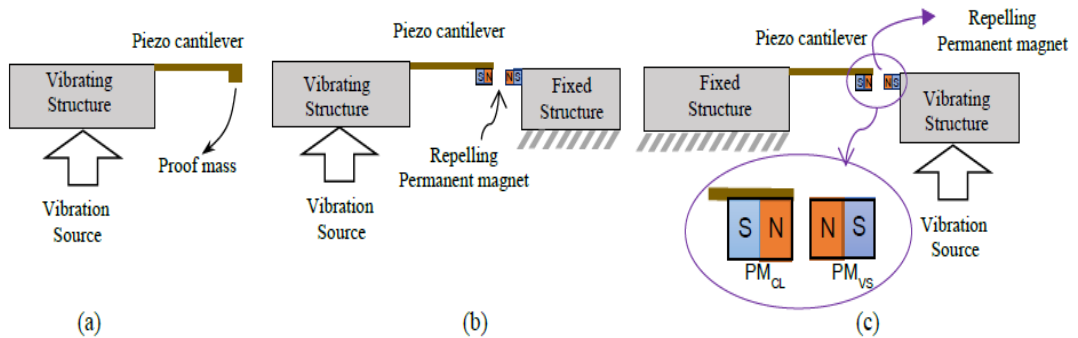
Benzer çalışmalardan biri de piezoelektrik enerji toplayıcıların manyetik kuvvetle frekans ayarı üzerine yapılmıştır. Bir kirişli bimorfa, elektrik yükünü beslemek için alternatif voltaj çıkışı üretmek üzere titreşen bir ana yapı üzerine yerleştirilmiştir. Bu durum Şekil 2.7'de gösterilmektedir. İki ilgili kayma vardır: u_{bu_bub} verici taban kayması ve u_{tu_tut} bimor ucu kaymasıdır. Piezoelektrik malzeme kullanarak enerji toplama, umut verici bir tekniktir, ancak üretilen voltaj miktarını sınırlayan bazı engeller vardır. Bu sınırlamalardan biri frekans

eşleşmesidir. Maksimum güç, toplayıcının doğal frekansı ile uyarı frekansı eşleştiğinde elde edilir. Üretim toleransları, uyarı frekansı değişiklikleri ve elektrik yükü değişiklikleri, frekans eşleşmesini zor bir konu haline getirir. Bu nedenle, ayarlanabilir toplayıcılar, bu tekniğin ticari olarak uygulanabilir olması için gereklidir (Al-Ashtari vd., 2012).



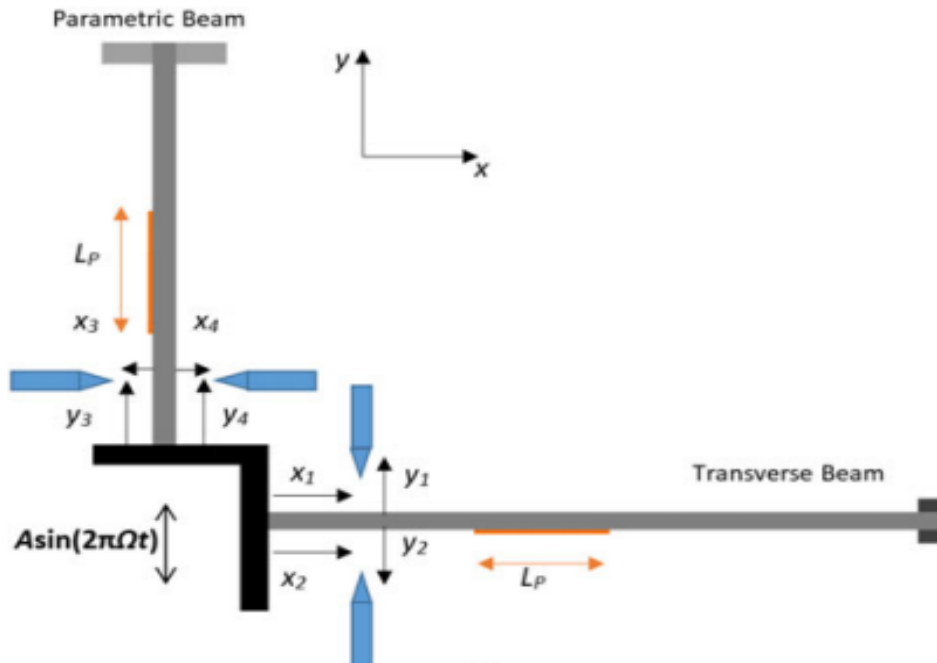
Şekil 2.7. Piezoelektrik enerji toplayıcıların manyetik kuvvetle frekans ayarı üzerine yapılan araştırmanın deney düzeneği
Kaynak: (Al-Ashtari vd., 2012).

Manyetik Bağlantılı Titreşim Kaynağından Piezoelektrik Enerji Toplama üzerine yapılan çalışma da ise Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, kirişli yapı sabit bir yapıya bağlanmıştır; bu, konvansiyonel veya iki kararlı yaklaşımlardan farklıdır. İki adet mıknatıs kullanılmıştır. Biri kirişin serbest ucuna yerleştirilirken diğeri titreşim kaynağına sıkıca monte edilmiştir. mıknatıslar, gösterildiği gibi itici modda bulunmaktadır. Prototipte kullanılan mıknatıslar NdFeB malzemesinden yapılmıştır. mıknatıslar arasında küçük bir hava boşluğu vardır. Bu sistem, mekanik modeller veya karşılık gelen elektriksel analogi yardımıyla analiz edilebilir. (Deepak ve George, 2020).



Şekil 2.8. Titreşimli manyetik alan ile gerçekleştirilen enerji hasadı sistemi
Kaynak: (Deepak ve George, 2020).

Diğer bir çalışmada, mekanik sınırlandırıcılarla desteklenmiş enine ve parametrik konsol kirişlerin eşzamanlı uyarımına dayalı bir enerji hasadı sistemi Şekil 2.9’da görüldüğü üzere tasarlanmış ve imal edilmiştir. Söz konusu tasarım, sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini etkinleştirerek enerji hasadı performansını artırmak ve böylece cihazın etkin çalışma bant genişliğini genişletmek amacıyla tercih edilmiştir. Enerji dönüşüm mekanizması olarak piezoelektrik dönüştürücüler kullanılmıştır. Geliştirilen L biçimli enerji hasadı prototipi, elektro-dinamik sarsıcı aracılığıyla farklı uyarım koşullarında ve çeşitli sınırlandırıcı konfigürasyonları altında deneysel olarak test edilmiş; elde edilen sonuçlar, önerilen tasarımın çalışma bant genişliğini artırmada sunduğu ilave avantajları ortaya koymuştur (Searle vd., 2017).

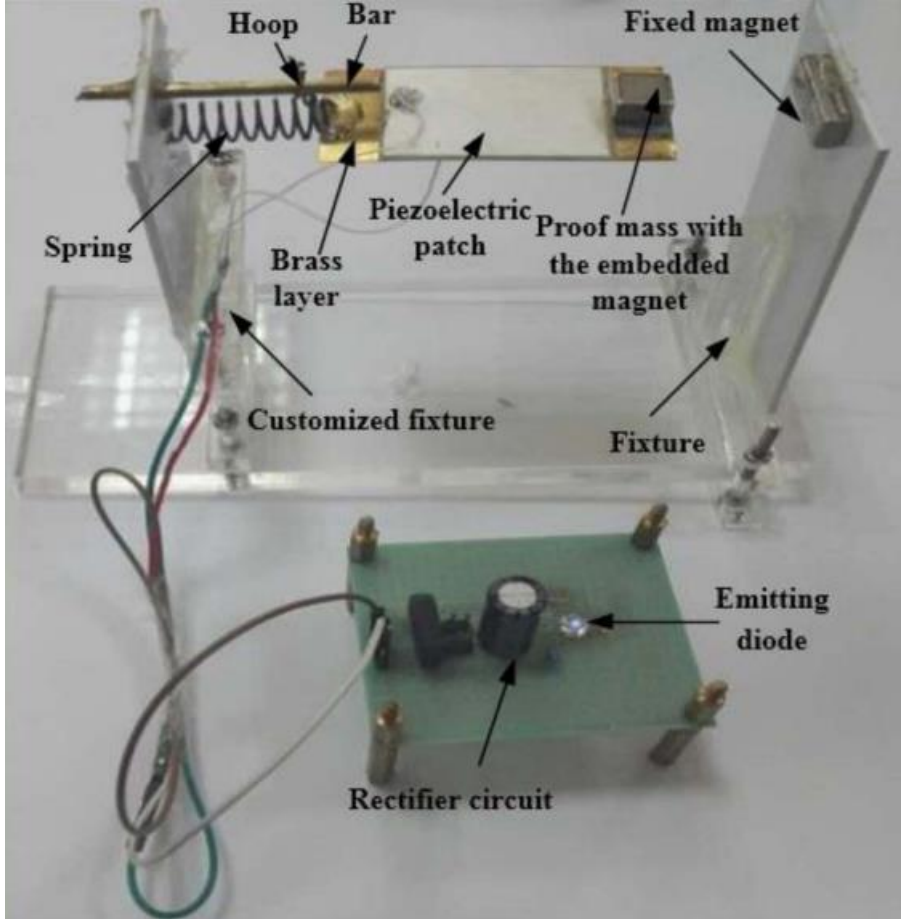


Şekil 2.9. Sistemin şematik gösterimi

Kaynak: (Searle vd., 2017).

Bu çalışmada ise çift yönlü titreşimlerden enerji toplayabilen, kiriş-yay tabanlı bir piezoelektrik enerji hasadı (PEH) sistemi sunulmaktadır (Şekil 2.10). Sistem, mekanik bir aygıt aracılığıyla gerçekleştirilen mekanik enerji tamponlaması sayesinde frekans yukarı dönüştürme (frequency up-conversion) işlevini yerine getirmektedir. Bu PEH’in temel özelliği, x yönlü titreşimi algılayan bir mekanik yayın kullanılması ve bu yayın, manyetik kuplaj aracılığıyla piezoelektrik konsol kirişi titreşime yönlendirmesidir. Böylelikle, çift yönlü frekans yukarı dönüştürme süreci yay ve manyetik kuplaj yardımıyla eşzamanlı olarak sağlanmakta ve

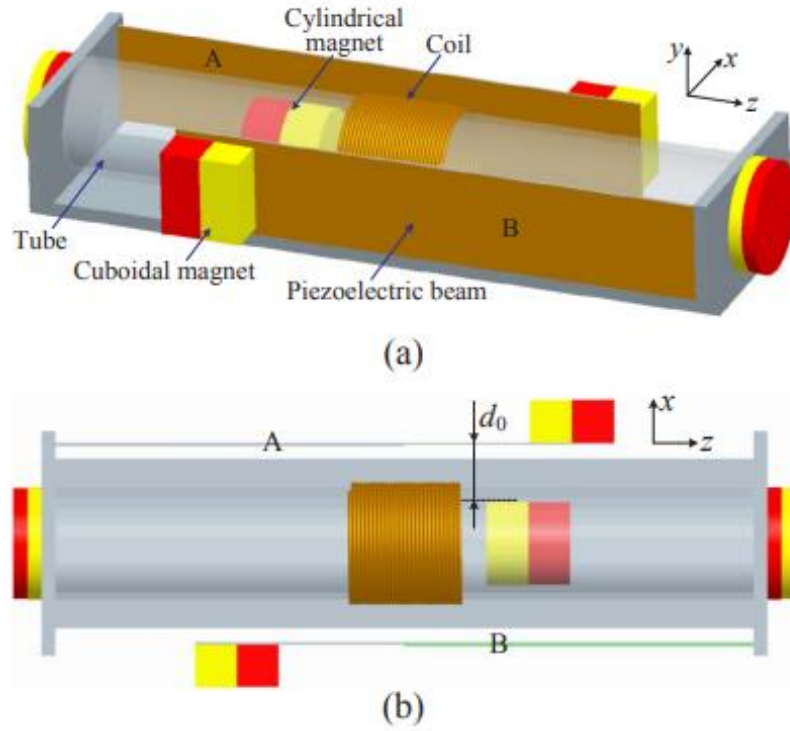
piezoelektrik konsol kirişi daima kendi doğal frekansında titreşmektedir. Mekanik enerji tamponlamasının prensibi, mekanik bir eleman aracılığıyla titreşim enerjisinin algılanıp depolanması ve depolanan enerjinin ani olarak serbest bırakılmasıyla piezoelektrik konsol kirişinin doğal frekansında titreşime geçmesidir. Bu çalışmada kullanılan mekanik eleman yaydır; çünkü yaylar titreşimi algılayabilmekte ve deformasyon yoluyla enerjiyi depolayabilmektedir (Wang vd., 2016).



Şekil 2.10. Deneysel gösterim
Kaynak: (Wang vd., 2016).

Diğer bir çalışmada ise, ultra düşük frekanslı uyarımlardan enerji elde edebilmek amacıyla piezoelektrik enerji hasadı (PEH) ile elektromanyetik enerji hasadını (EMEH) bir araya getiren çift yönlü hibrit bir enerji hasadı (HEH) sistemi önerilmiştir. Şekil 2.11’de gösterilen sistemde askıya alınmış bir mıknatıs kullanılarak, hem bobinlerde elektriksel indüksiyon yoluyla enerji üretimi sağlanmış hem de ultra düşük frekanslı uyarımlar piezoelektrik kirişlerin doğal frekanslarında serbest titreşime dönüştürülerek frekans yukarı dönüştürme gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, tek bir uyarım üzerinden iki farklı enerji dönüştürme mekanizmasının eşzamanlı

olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Deneysel bulgular, piezoelektrik kısmı oluşturan her bir kirişin doğrudan 1.5 g genlikli sinüzoidal titreşim ile uyarıldığında 0.32 *mW* tepe gücü üretebildiğini göstermektedir. Askıya alınmış mıknatıs aynı koşullarda titreşime maruz bırakıldığında ise elektromanyetik kısımdan 1.23 *mW*, piezoelektrik kısımdan ise 0.18 *mW* güç çıktısı elde edilmiştir. Ayrıca yapılan modelleme çalışmaları, teorik simülasyonlar ile deneysel gözlemler arasında uyumlu sonuçlar vermiştir. Çalışmada uygulanan el sallama testi ise, hibrit sistemin tekil enerji hasadı birimlerine kıyasla daha yüksek şarj performansı sergilediğini ortaya koymuş ve üretilen prototipin onlarca LED'i yakabilecek kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, söz konusu tasarımın taşınabilir güç kaynağı uygulamaları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır (Fan vd., 2018).



Şekil 2.11. Önerilen HEH'in konfigürasyonu. (a) Kavramsal diyagram ve (b) Üstten görünüm
Kaynak: (Fan vd., 2018).

İncelenen literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere, piezoelektrik malzemelerden faydalanılarak gerçekleştirilen enerji hasadı yöntemleri, özellikle sürdürülebilirlik ve uygulanabilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Piezoelektrik tabanlı sistemler, çevrede mevcut olan titreşim enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini mümkün kılmakta ve bu sayede hem yenilenebilir hem de çevre dostu bir enerji üretim alternatifi ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin hassasiyetleri ve farklı geometrik konfigürasyonlara

uyarlanabilir yapıları, onları çeşitli mühendislik uygulamaları açısından cazip kılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında, literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu projede, piezoelektrik malzeme iki kiriş üzerine birbirine dik olacak şekilde yerleştirilecek ve kirişlerin uç kısımlarına mıknatıslar monte edilerek sistemin titreşime geçmesi sağlanacaktır. Böylece, enerji hasadı yalnızca belirli bir yöndeki kuvvet bileşenine bağlı olmaksızın gerçekleştirilebilecek ve bu durum, klasik tasarımlarda karşılaşılan yön bağımlılığı sorununu önemli ölçüde ortadan kaldıracaktır.

3.ENERJİ HASADININ ÖNEMİ VE GELECEĞİ

Türkiye, artan nüfusu, büyüyen sanayi sektörü ve kentleşme sürecine paralel olarak her yıl yükselen bir enerji talebi ile karşı karşıyadır. Ülkenin enerji tüketimi yıllar içinde sürekli artış göstermekte, bu da hem dışa bağımlılığı hem de enerji arz güvenliği konusundaki riskleri derinleştirmektedir. Türkiye'nin enerji ihtiyacının yaklaşık %70'i ithalat yoluyla karşılanmakta olup, bu durum ekonomik sürdürülebilirlik ve dış ticaret dengesi üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır. Ayrıca fosil yakıt kullanımının çevresel etkileri, özellikle hava kirliliği ve sera gazı emisyonları, Türkiye'nin iklim değişikliği ile mücadele çabalarını da zorlaştırmaktadır.

Bu bağlamda, enerji hasadı teknolojileri, Türkiye'nin enerji politikaları açısından stratejik bir fırsat sunmaktadır. Enerji hasadı, çevrede bulunan düşük seviyeli enerji kaynaklarının örneğin güneş, rüzgâr, mekanik titreşim, ısı farkları ve elektromanyetik dalgalar– elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayarak, mikro ölçekte sürekli ve temiz enerji üretimi gerçekleştirmektedir. Türkiye'nin jeostratejik konumu ve doğal kaynak çeşitliliği dikkate alındığında, bu teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için oldukça elverişli bir zemin mevcuttur. Örneğin, Türkiye'nin geniş güneşlenme süresi ve rüzgâr potansiyeli, enerji hasadı uygulamalarında verimliliği artıracak temel faktörler arasındadır. Enerji hasadının Türkiye açısından önemini birkaç temel başlık altında incelemek mümkündür:

Enerji Arz Güvenliği: Enerji hasadı, küçük ölçekli fakat sürdürülebilir enerji üretimi sağlayarak Türkiye'nin dışa bağımlılığını azaltma yönünde katkı sunabilir. Özellikle kırsal bölgelerde veya enerji altyapısının yetersiz olduğu alanlarda enerji hasadı teknolojileri kritik bir alternatif olarak değerlendirilebilir. **Ekonomik Kazanımlar:** Batarya kullanımının azaltılması, bakım ve işletme maliyetlerinin düşmesi ile uzun vadede ekonomik verimlilik sağlanmaktadır. Türkiye'nin geniş endüstriyel altyapısı göz önüne alındığında, enerji hasadı ile çalışan sensör ve otomasyon sistemlerinin yaygınlaştırılması, üretim süreçlerinde enerji maliyetlerini azaltabilir.

Çevresel Sürdürülebilirlik: Türkiye'nin Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde üstlendiği karbon azaltım hedefleri, temiz enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasını zorunlu kılmaktadır. Enerji hasadı, fosil yakıtlara alternatif olarak düşük karbonlu çözümler sunmakta, böylece çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır. **Teknolojik ve Endüstriyel Gelişim:** Enerji hasadı teknolojilerinin geliştirilmesi, Türkiye'nin teknoloji

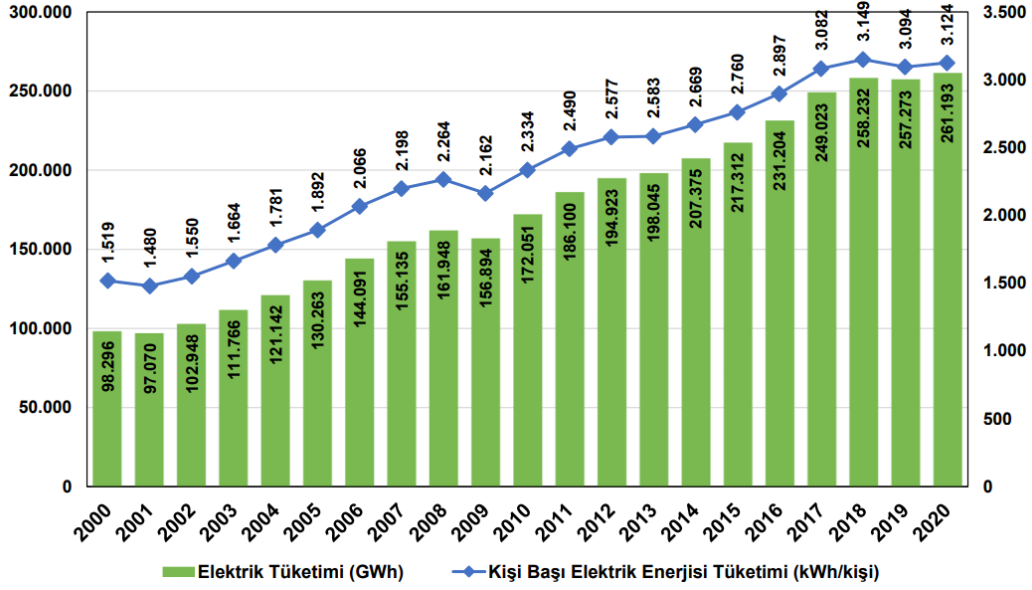
üretim kapasitesini artırma yönünde stratejik bir adım olacaktır. Yerli üretim kabiliyetlerinin güçlendirilmesi, küresel pazarda rekabet avantajı sağlayabilir.

Gelecek perspektifinde, enerji hasadının Türkiye’de daha geniş ölçekli uygulamalara entegre edilmesi beklenmektedir. Akıllı şehir projeleri, sürdürülebilir ulaşım sistemleri, tarımda otomasyon çözümleri ve sağlık teknolojileri, enerji hasadının kritik kullanım alanları arasında yer alacaktır. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarının Türkiye’de hızla yaygınlaşması, enerji hasadına olan ihtiyacı artırmaktadır. Pil bağımlılığını azaltan ve kendi kendine enerji üreten cihazlar, ülkenin dijital dönüşüm süreçlerinde enerji verimliliğini ön plana çıkaracaktır. Ayrıca, üniversiteler, araştırma merkezleri ve özel sektör iş birlikleriyle geliştirilecek Ar-Ge projeleri, Türkiye’de enerji hasadı teknolojilerinin yaygınlaşmasını hızlandıracaktır. Nano-malzeme tabanlı enerji dönüştürücüler, hibrit enerji hasadı sistemleri ve yapay zekâ destekli enerji yönetimi uygulamaları, Türkiye’nin teknoloji politikalarında öncelikli alanlardan biri haline gelebilir. Bu sayede, yalnızca enerji bağımlılığı azaltılmayacak, aynı zamanda yüksek katma değerli teknolojilerin üretimiyle ekonomik büyümeye de katkı sağlanacaktır.

Sonuç olarak, enerji hasadı Türkiye için yalnızca bir enerji üretim yöntemi değil, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve teknolojik dönüşümün bir parçasıdır. Ülkenin enerji stratejilerinde enerji hasadına yönelik yatırımların artırılması, gelecekte hem sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına hem de küresel ölçekte rekabet gücünün artırılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

3.1.Türkiye’nin Yıllık Enerji Tüketimi ve Enerji İhtiyacı

Türkiye’nin elektrik tüketimi son yıllarda Şekil 3.1’de görüldüğü üzere sürekli bir artış göstermektedir. Özellikle ekonomik büyüme, sanayileşme ve nüfus artışı enerji talebini doğrudan etkilemektedir. Türkiye’nin elektrik tüketimi 2000 yılında 98 TWh seviyesindeyken, 2020 yılında yaklaşık 261 TWh’ye ulaşmıştır. Bu artış, yalnızca beş yıllık dönemde %13’ün üzerinde bir yükselişe karşılık gelmektedir



Şekil 3.1. Türkiye elektrik tüketimi
Kaynak: (TEİAŞ).

Grafik incelendiğinde, Türkiye'nin elektrik tüketimindeki yükseliş eğiliminin uzun vadede devam etmesi beklenmektedir. Bu durum, ülkenin enerji altyapısının sürekli güçlendirilmesini ve yeni üretim kapasitesinin devreye alınmasını zorunlu kılmaktadır. Enerji tüketiminin sektörel dağılımı da dikkate değerdir. 2023 verilerine göre, enerji tüketiminin yaklaşık %31'i sanayi, %25'i ulaştırma, geri kalan kısmı ise konut ve hizmet sektöründe gerçekleşmiştir. Bu tablo, Türkiye'nin enerji ihtiyacının yalnızca elektrik üretimiyle sınırlı olmadığını; ulaşım, sanayi üretimi ve ısınma gibi farklı alanlarda yoğun bir enerji talebinin bulunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin artan enerji ihtiyacı hem arz güvenliği hem de dışa bağımlılık açısından kritik bir mesele olmaya devam etmektedir. Elektrik tüketimindeki istikrarlı artış ve birincil enerji arzındaki yükseliş eğilimi, enerji yatırımlarının sürdürülebilir ve çeşitlendirilmiş kaynaklara yönltilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji yatırımlarının hızlanması, enerji verimliliği projelerinin yaygınlaştırılması ve enerji hasadı gibi yenilikçi teknolojilerin devreye alınması, Türkiye'nin uzun vadeli enerji stratejilerinde belirleyici olacaktır.

3.2. Küresel Enerji İhtiyacı

Küresel enerji tüketiminin yıllara göre artışı, bölgeler arasındaki dengesiz dağılım ve

fosil yakıtların hâlâ baskın konumda olması, sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır. Artan enerji talebi, yalnızca mevcut kaynakların hızla tükenmesine değil, aynı zamanda çevresel sorunların (sera gazı emisyonları, iklim değişikliği, hava kirliliği vb.) derinleşmesine de yol açmaktadır. Bu bağlamda, geleneksel enerji kaynaklarına alternatif ve çevre dostu çözümler geliştirmek günümüzün en kritik araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir. Özellikle düşük güçlü elektronik cihazların, sensörlerin ve kablosuz sistemlerin enerji ihtiyacını karşılamak için enerji hasadı teknolojileri öne çıkmaktadır. Enerji hasadı, çevrede mevcut olan titreşim, ısı, ışık ve elektromanyetik dalgalar gibi dağınık enerjilerin toplanarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle, küresel enerji tüketimindeki eğilimler ile birlikte, yenilenebilir ve sürdürülebilir mikro-enerji çözümlerine olan talep giderek artmaktadır. 1970’li yıllardaki petrol krizleri kısa süreli dalgalanmalara yol açsa da özellikle 2000 sonrası dönemde tüketimdeki artış hız kazanmıştır. Bu durum, başta Asya-Pasifik bölgesinde gerçekleşen hızlı ekonomik büyüme, sanayileşme ve kentleşmenin doğrudan bir sonucudur.

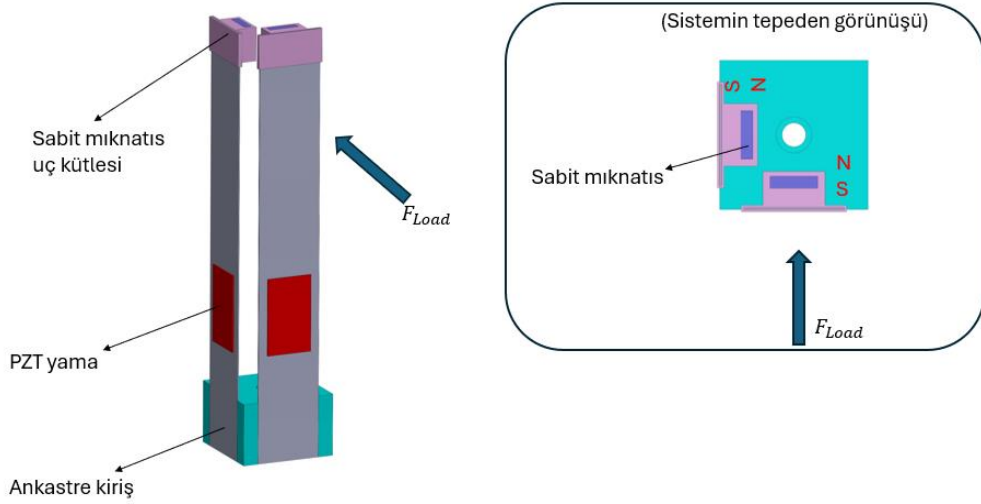
Sonuç olarak, Türkiye’nin giderek artan elektrik tüketimi, yalnızca makro ölçekli enerji üretim çözümleriyle değil, aynı zamanda mikro ölçekte yenilikçi yaklaşımlarla da desteklenmeyi gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, tez kapsamında geliştirilen çift ankastre kırıli ve manyetik uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sistemi, bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Söz konusu sistem, mevcut enerji politikalarının mikro düzeyde tamamlayıcısı olma potansiyeli taşıırken; düşük güçlü elektroniklerin sürdürülebilir biçimde beslenmesine olanak tanıyarak enerji verimliliğine doğrudan katkı sağlamaktadır. Böylelikle çalışma hem bilimsel hem de teknolojik açıdan Türkiye’nin artan enerji ihtiyacına paralel olarak ortaya çıkan yeni çözümlerden biri olma özelliğini taşımaktadır.

4.METHOD

Klasik piezoelektrik ankastre giriş enerji hasadı sistemlerinde, rüzgâr veya akış yönünde konumlandırılan giriş, titreşimler oluşturarak piezoelektrik malzeme üzerinden enerji hasadı gerçekleştirir. Bu sistemler genellikle yalnızca akış doğrultusunda hareket eden titreşimlere duyarlı olacak şekilde tasarlandığından, akış yönüne dik doğrultulardan gelen rüzgâr etkisi altında verimlilikleri düşer. Dolayısıyla, farklı yönlerden gelen akış etkilerinde sistemin performansı sınırlı kalır. Ancak bu çalışmada, klasik piezoelektrik enerji hasadı yapılarından farklı olarak, akış yönünden bağımsız olarak her iki girişinde de titreşmesi hedeflenmektedir. Bu etki, girişlerin uç kısımlarına yerleştirilen sabit mıknatıslar yardımıyla oluşturulacaktır.

Önerilen sistemde, birbirine dik olacak şekilde yerleştirilmiş iki adet piezoelektrik yamalı ankastre giriş bulunmaktadır. Bu girişlerden biri akış yönünde konumlandırılmış ve diğeri ise akış yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Akış yönünde konumlanan giriş, rüzgârın etkisiyle titreşmeye başladığında, uç kısmında bulunan sabit mıknatıs yardımıyla bir manyetik kuvvet oluşturur. Bu manyetik kuvvet, dik konumlandırılmış diğeri girişe etki eder ve onu da harekete geçirir. Böylece, akış doğrultusunda olmayan ikinci giriş de bu manyetik kuvvet etkisiyle titreşmeye başlar ve her iki girişte de eş zamanlı olarak enerji hasadı gerçekleştirilir.

Bu yapı, sadece akış yönüne paralel gelen rüzgâr etkisini değil, aynı zamanda farklı açılardan gelen ve klasik sistemlerde genellikle göz ardı edilen akış etkilerini de enerjiye dönüştürebilme kapasitesine sahiptir. Önerilen bu yenilikçi tasarım sayesinde, akış yönünden bağımsız bir enerji hasadı gerçekleştirilmiş olacaktır.



Şekil 4.1. Deney düzeneği.

Şekil 4.1’de gösterilen bu özgün enerji hasadı sistemi, birbirine dik konumlandırılmış iki piezoelektrik yama entegreli kirişten oluşmaktadır. Akış yönünde konumlanan birinci kiriş, gelen akışın doğrudan etkisi ile titreşmeye başlarken, akışa dik olan ikinci kiriş, manyetik kuvvetlerin etkisiyle dolaylı olarak titreşime zorlanacaktır. Bu sayede, her iki kirişten de elde edilen voltaj çıktısı artacak ve toplam enerji verimliliği önemli ölçüde yükseltilecektir. Bu çalışma, klasik piezoelektrik enerji hasadı yöntemlerinden farklı olarak, birden fazla titreşim modunu harekete geçiren ve akış yönünden bağımsız enerji hasadını mümkün kılan yenilikçi bir tasarım sunmaktadır. Önerilen bu yöntem ile akışın farklı açılardan geldiği karmaşık çevre koşullarında dahi enerji elde edilebileceği deneysel olarak gösterilecektir.

4.1. Lagrange Hareket Denklemine Tanıtımı

Mekanik sistemlerin dinamik davranışlarını anlamak ve modellemek, mühendislik uygulamaları açısından son derece kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, klasik mekanikte kullanılan Newton’un ikinci hareket yasası, birçok durumda yeterli olmakla birlikte, özellikle çok serbestlik dereceli, bağlı (constrained) veya karmaşık yapıdaki sistemlerde çözümlene gücünü yaratabilmektedir. Bu gibi durumlarda, daha sistematik ve genel bir yaklaşım sunan Lagrange mekanik formülasyonu, mühendislik sistemlerinin modellenmesinde yaygın biçimde tercih edilmektedir.

Lagrange hareket denklemi, aşağıdaki genel ifade ile tanımlanır:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_i} = Q_i .$$

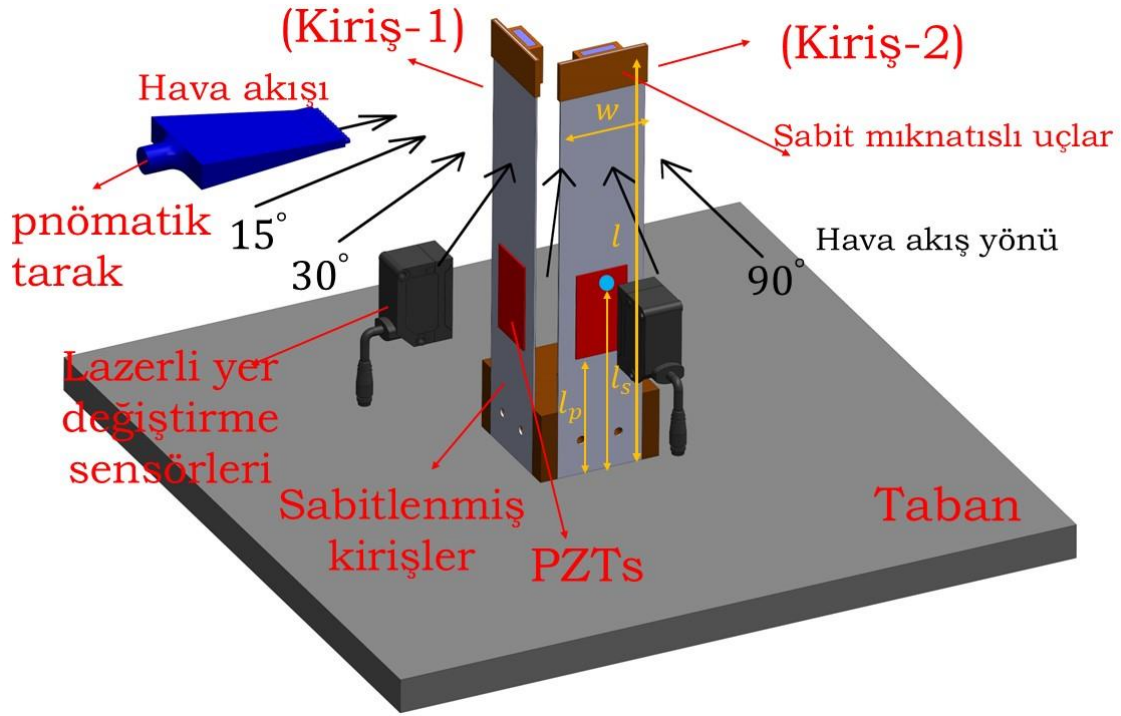
Bu denklemde, Q_i , sistem üzerindeki genelleştirilmiş dış kuvvetleri göstermektedir. Sistemin tüm serbestlik dereceleri için bu denklem ayrı ayrı yazılarak, bir diferansiyel denklem sistemi elde edilir. Bu sistem, yapının zamana bağlı konum, hız ve ivme gibi dinamik tepkilerini belirlemede kullanılır.

Lagrange yaklaşımı, özellikle rijit gövde mekaniği, titreşim analizi, kontrol sistemleri ve piezoelektrik enerji hasadı gibi disiplinlerde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Karmaşık sistem geometrilerinin, doğrusal olmayan kuvvetlerin veya bağlayıcı kısıtların mevcut olduğu durumlarda, Newton mekaniğine göre daha kolay ve sistematik bir yol sunar.

Bu çalışmada incelenen piezoelektrik enerji hasadı sisteminin dinamik modeli de, Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede sistemin hem mekanik hem de elektriksel bileşenlerinin birlikte değerlendirildiği kapsamlı bir modelleme yaklaşımı benimsenmiş, sistemin davranışı daha doğru şekilde tahmin edilmiştir.

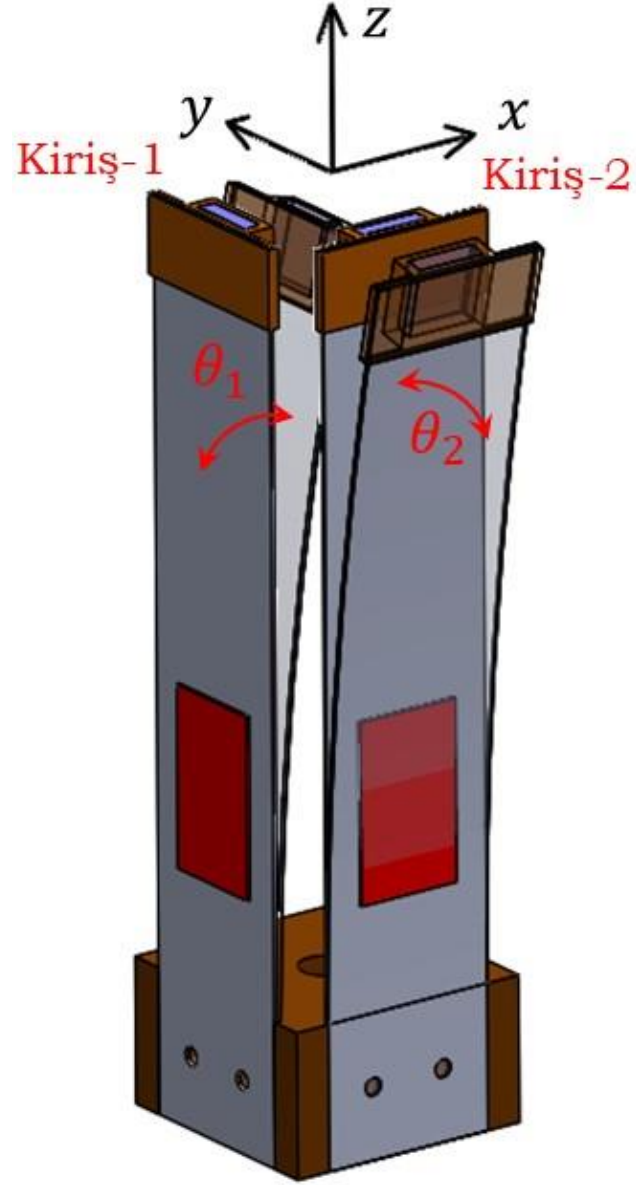
4.2. Matematiksel Model

Dikey manyetik kaplinli enerji hasadı sistemi incelenmiş olup sistemin matematiksel modellenmesi ayrıntılı olarak sunulmuştur. Sistemin şematik bir görsel Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi sistem hava akışıyla titreştirilerek yönden bağımsız bir şekilde enerji hasadını gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sistem yön bağımsız olarak enerji toplamaya imkân sağlamaktadır. Burada geliştirilen matematiksel model, aerodinamik uyarım, yapısal esneklik ve manyetik kuvvetlerin etkilerini dikkate alarak sistemin bağlı dinamiklerini kapsamaktadır.



Şekil 4.2. Manyetik uç kütleli ankastre kirişli enerji hasadı sistemi şematik gösterimi.

Kullanılan matematiksel modeldeki kiriş elemanlarının yer değiştirmeleri, Şekil 4.3'te Kiriş-1 ve Kiriş-2 için gösterilmiştir. Bu yer değiştirme değişkenleri, sistem davranışını yöneten dinamik denklemlerin türetilmesinin temelini oluşturmaktadır. Şekil 4.3'te gösterilen yer değiştirmeler, hareket değişkenlerinin daha net anlaşılabilmesi ve takibinin kolaylaştırılması amacıyla kirişin uç noktasında tasvir edilmiştir. Ancak, dinamik modelde yerel koordinat sisteminin kirişin kütle merkezinde konumlandığı varsayılmaktadır. Her bir kiriş için doğrusal ve açısal serbestlik derecelerinin seçilmesi, aerodinamik uyarım altındaki titreşim tepkisinin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.3. Kirişler üzerindeki yer değiştirme.

Kiriş-1 (x yönünde hizalanmış, x-z düzleminde titreşen):

$$\vec{r}_1 = \begin{bmatrix} l \sin \theta_1 \\ 0 \\ l - l \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Kiriş-2 (y yönünde hizalanmış, y-z düzleminde titreşen):

$$\vec{r}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ l \sin \theta_2 \\ l - l \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bu konum vektörlerinin zamana göre türevleri, hız vektörlerini verir ve şu şekilde tanımlanır:

$$\dot{\vec{r}}_1 = l\dot{\theta}_1 \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ 0 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\dot{\vec{r}}_2 = l\dot{\theta}_2 \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Her bir kiriş için kinetik enerji terimi, hem dönme hem de öteleme kinetik enerjisini içermektedir ve şu şekilde tanımlanır:

$$T = \frac{1}{2}J\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m\dot{\vec{r}}_1^T \dot{\vec{r}}_1 + \frac{1}{2}m\dot{\vec{r}}_2^T \dot{\vec{r}}_2 \quad (4.5)$$

Burada m her bir kirişin kütlesini temsil eder ve $J = (1/3)ml^2$ her bir kirişin kütle atalet momentidir. Uç noktadaki mesafe vektörleri şu şekilde tanımlanabilir:

$$\vec{r}_1 - \vec{r}_2 = \begin{bmatrix} l \sin \theta_1 \\ -l \sin \theta_2 \\ l(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Bu farkın norm karesi (Öklidyen mesafenin karesi), potansiyel enerji denkleminde kullanılacaktır.

$$\|\vec{r}_1 - \vec{r}_2\|^2 = l^2 \sin^2 \theta_1 + l^2 \sin^2 \theta_2 + l^2 (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)^2 \quad (4.7)$$

Görelî sapmalarından dolayı depolanan elastik potansiyel enerji aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$U = \frac{1}{2}k(l^2 \sin^2 \theta_1 + l^2 \sin^2 \theta_2 + l^2 (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)^2) \quad (4.8)$$

Sistemdeki kinetik enerji, her bir kirişin mutlak hareketine bağlı olarak bağımsız şekilde formüle edilirken, potansiyel enerji iki kiriş ucunun görelî yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu modelleme yaklaşımı, kirişler arasındaki manyetik etkileşimin doğasını yansıtmaktadır; çünkü manyetik kuvvet, yalnızca kiriş uçları arasındaki mesafeye bağlı olarak karşılıklı bir bağlayıcı kuvvet şeklinde etki eder. Bu nedenle, görelî konum vektörü $\|\vec{r}_1 - \vec{r}_2\|$ kullanılarak tanımlanan tek bir potansiyel enerji ifadesi, manyetik etkileşimi doğru bir şekilde temsil etmektedir. Etkileşim her iki kirişe ayrı ayrı değil, ortak bir biçimde uygulandığı için, tek bir yay sabiti k 'nin kullanılması yeterli olmaktadır.

Sönüm enerjisi ise, kiriş sisteminde viskoz sönümlenme nedeniyle meydana gelen enerji kayıplarını modellemektedir. Bu tür sönümlenme, hem malzeme içindeki iç sürtünmeyi hem de çevresel ortamdan kaynaklanan direnci temsil etmektedir ve aşağıda tanımlandığı şekilde ifade edilir:

$$D = \frac{1}{2} C (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \quad (4.9)$$

Burada c , Kiriş-1 ve Kiriş-2 için sönüm katsayılarını temsil eder.

Mekanik olarak deforme edildiklerinde gerilim üreten malzemeler olan piezoelektrik plakalar, sistemde kirişlerin hareketini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır. Kirişler eğildiğinde veya titreştiğinde, piezoelektrik elemanlar gerilime maruz kalır. Bu mekanik deformasyon, elektromanyetik olarak çıkış gerilimiyle ilişkili bir tork üretir. Elektromekanik bağlaşım, her bir kiriş için piezoelektrik çıkış gerilimi v_i ve yük q_i modellenerek sisteme dahil edilir. Piezoelektrik elemanın kiriş boyunca belirli bir konuma yapıştırıldığı varsayıldığında, elektromekanik bağlaşım torku şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{\theta_i}^{Pzt} = -a_i v_i, \quad i=1,2 \quad (4.10)$$

Burada $Q_{\theta_i}^{Pzt}$, piezoelektrik etkinin mekanik sisteme uyguladığı torku ifade ederken, a_i elektromekanik bağlaşım katsayısını ve v_i her bir kiriş üzerindeki piezoelektrik plaka boyunca üretilen gerilimi temsil etmektedir. Ayrıca, piezoelektrik devrenin elektriksel dinamikleri basit bir direnç yükü R kullanılarak modellenmiştir.

$$c_{pzt} \dot{v}_i + \frac{v_i}{R} = a_i \dot{\theta}_i \quad i=1,2 \quad (4.11)$$

Burada c_{Pzt} , piezoelektrik plakanın eşdeğer kapasitansını ifade etmektedir. Bu denklem, kirişin mekanik hareketinin nasıl elektrik enerjisi ürettiğini, bu enerjinin bir kapasitörde nasıl depolandığını ve bir direnç üzerinden nasıl tüketildiğini açıklamaktadır.

Uçlarına yerleştirilmiş kalıcı mıknatısların etkileşimi sonucunda iki kiriş arasında manyetik bir tork oluşur. Kiriş-1, Kiriş-2 ile arasındaki açısal farka bağlı olarak bir manyetik torka maruz kalır. Öte yandan, Kiriş-2 de Newton'un üçüncü yasası gereği eşit büyüklükte fakat zıt yönde bir torka maruz kalır. Manyetik kuplaj torku aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$Q_{\theta_1}^{mag} = M_{mag}(\theta_2 - \theta_1) \quad (4.12)$$

$$Q_{\theta_2}^{mag} = -M_{mag}(\theta_2 - \theta_1) \quad (4.13)$$

Burada M_{mag} , kalıcı mıknatısların etkileşimi sonucu oluşan manyetik kuplaj torkunu ifade eder ve bu kuplaj, kalıcı mıknatısların modelleme özelliklerine bağlı olarak doğrusal ya da doğrusal olmayan şekilde tanımlanabilir. Dinamik sistemin son tanımı ise, Kiriş-1'e uygulanan aerodinamik uyarımı kapsamaktadır.

$$Q_{\theta_1}^{aero} = M_0 \cos(\omega t) \quad (4.14)$$

Burada $Q_{\theta_1}^{aero}$, hava akımı nedeniyle Kiriş-1'e uygulanan dış momenti (torku) temsil eder. M_0 , aerodinamik momentin genliğidir ve hava uyarımıyla üretilen maksimum tork olarak yorumlanabilir, ω ise uyarım frekansıdır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_i} = Q_i, \quad i=1,2 \quad (4.15)$$

Burada $L = T - U$, kinetik enerji ile potansiyel enerji arasındaki fark olan Lagrangian'ı temsil eder; θ_i bir genelleştirilmiş koordinat, Q_i ise genelleştirilmiş dış kuvvetleri veya momentleri (manyetik, piezoelektrik, aerodinamik dahil) ifade eder. Bu tanımlamalar sonucunda elde edilen enerji toplayıcı sistemine ait bağlı diferansiyel denklemler şunlardır:

$$J\ddot{\theta}_1 + c\dot{\theta}_1 + k l^2 (\sin \theta_1 \cos \theta_1 + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \sin \theta_1) = M_{mag}(\theta_2 - \theta_1) + M_0 \cos(\omega t) - a_1 v_1, \quad (4.16)$$

$$J\ddot{\theta}_1 + c\dot{\theta}_1 + kl^2 (\sin \theta_2 \cos \theta_2 + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \sin \theta_2) = M_{mag}(\theta_2 - \theta_1) - a_2 v_2, \quad (4.17)$$

Gerilim dinamikleri ile:

$$c_{Pzt}\dot{V}_1 + \frac{V_1}{R} = a_1\dot{\theta}_1 \quad (4.18)$$

$$c_{Pzt}\dot{V}_2 + \frac{V_2}{R} = a_2\dot{\theta}_2 \quad (4.19)$$

Bu formülasyon, önerilen enerji toplama sisteminin dinamikleri için temel oluşturur.

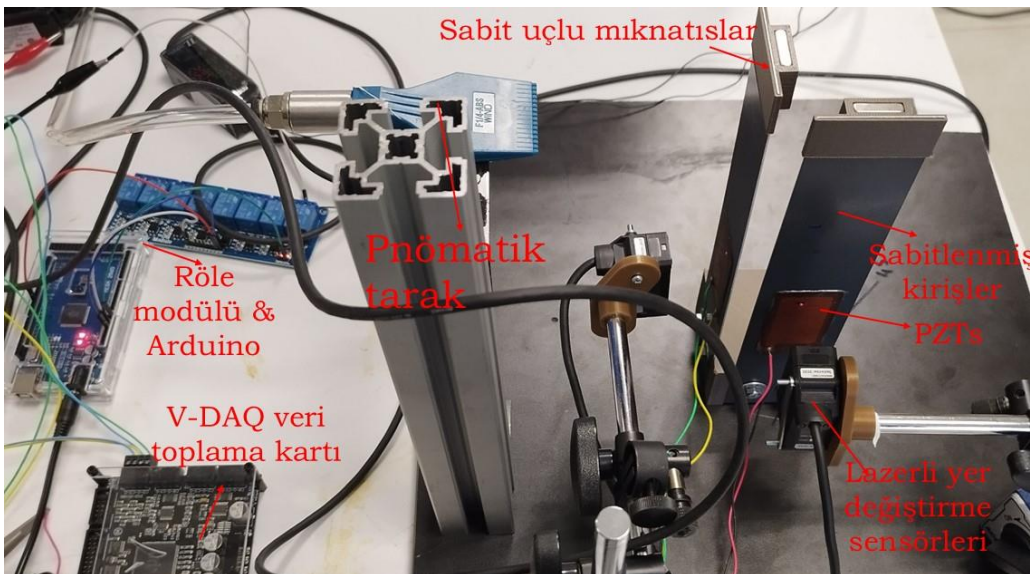
Tablo 4.1. Dik Manyetik bağlamalı çift kirişli enerji hasadı sistemi parametreleri.

Isim	Sembol	Değer	Birim
PZT ölçüleri	$lpzt$ $bpzt$ $hpzt$	\times \times 61×35×0.5	[mm]
Kiriş ölçüleri	$l \times w \times t$	250×50×1.1	[mm]
Kütle atalet momenti	J	7.7688×10^{-4}	[kgm ²]
Kiriş kütlesi	m	0.0373	[kg]
Sönüm katsayısı	c	1.5764×10^4	[Ns/m]
Yay katsayısı	k	3.4×10^9	[N/m]
Taban ile PZT yamalar arasındaki mesafe	lp	55	[mm]
Taban ile lazer sensörü ölçüm noktaları arasındaki mesafe	ls	105	[mm]
Mıknatısların boyutları	lpm wpm tpm	\times \times 20×20×5	[mm]
Çapraz mıknatıslanmış silindirik kalıcı mıknatısın boyutları	$ldpm$ $ddpm$	\times 10×10	[mm]

4.3. Deneysel Modelleme

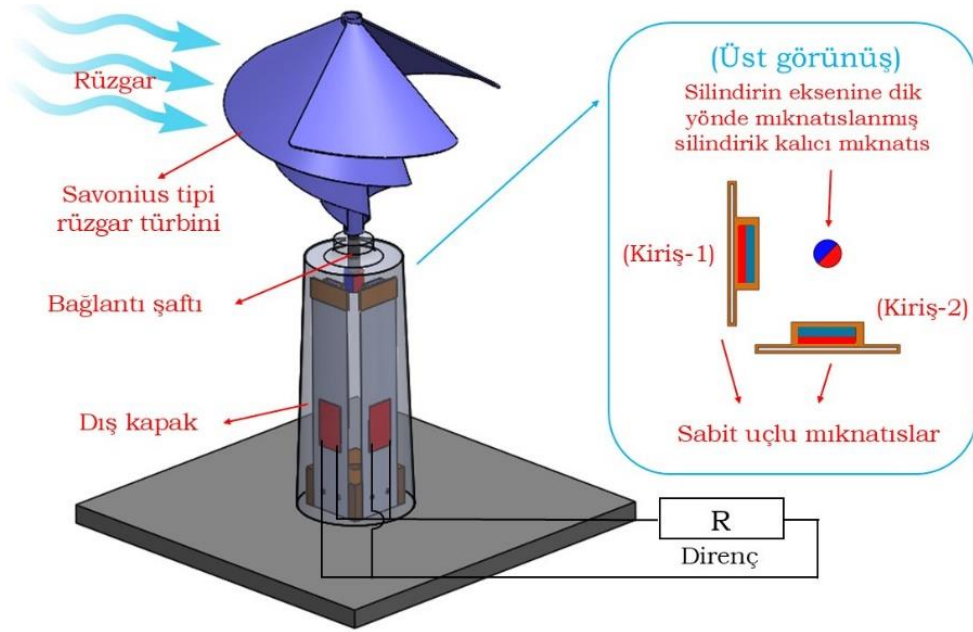
Şekil 4.4'te, dikey manyetik bağlamaya sahip çift kirişli enerji hasadı sistemine ait deney düzeneği ayrıntılı biçimde gösterilmektedir. Deneysel süreçte, sistemin her iki kirişinin hareketleri, temassız bir lazer deplasman sensörü yardımıyla yüksek hassasiyetle ölçülmüştür. Elde edilen yer değiştirme verileri, gerçek zamanlı izleme ve sonrasında analiz yapılabilmesi amacıyla V-DAQ veri toplama kartı üzerinden ana bilgisayara aktarılmıştır.

Aynı anda, her bir kiriş üzerine yerleştirilen piezoelektrik yamaların ürettiği elektriksel sinyaller çift kanallı bir osiloskop aracılığıyla kaydedilmiştir. Bu amaçla, her iki kirişte enerji dönüşümü sağlamak üzere DuraAct P-876 tipi iki piezoelektrik yama kullanılmıştır. Deney sırasında, Kiriş-1, bir hava tarağı cihazı ile yönlendirilen hava akımıyla mekanik olarak uyarılmış ve bu sayede yapısal titreşimler elde edilmiştir. Titreşimler, sistemdeki sabit mıknatısların konumlandırılması sayesinde Kiriş-2'ye manyetik olarak aktarılmıştır. Böylece, doğrudan uyarılmayan Kiriş-2, manyetik bağlama yoluyla titreşime geçirilerek enerji üretimine katkı sağlamıştır. Bu deneysel düzenek, yalnızca tek bir aerodinamik girişle iki farklı piezoelektrik kirişten eşzamanlı enerji üretilebildiğini göstermiş; ayrıca sistemin yön bağımsız ve çok kaynaklı enerji hasadı yapabilme yeteneğini başarıyla ortaya koymuştur.



Şekil 4.4. Önerilen sistemin deneysel düzeneği.

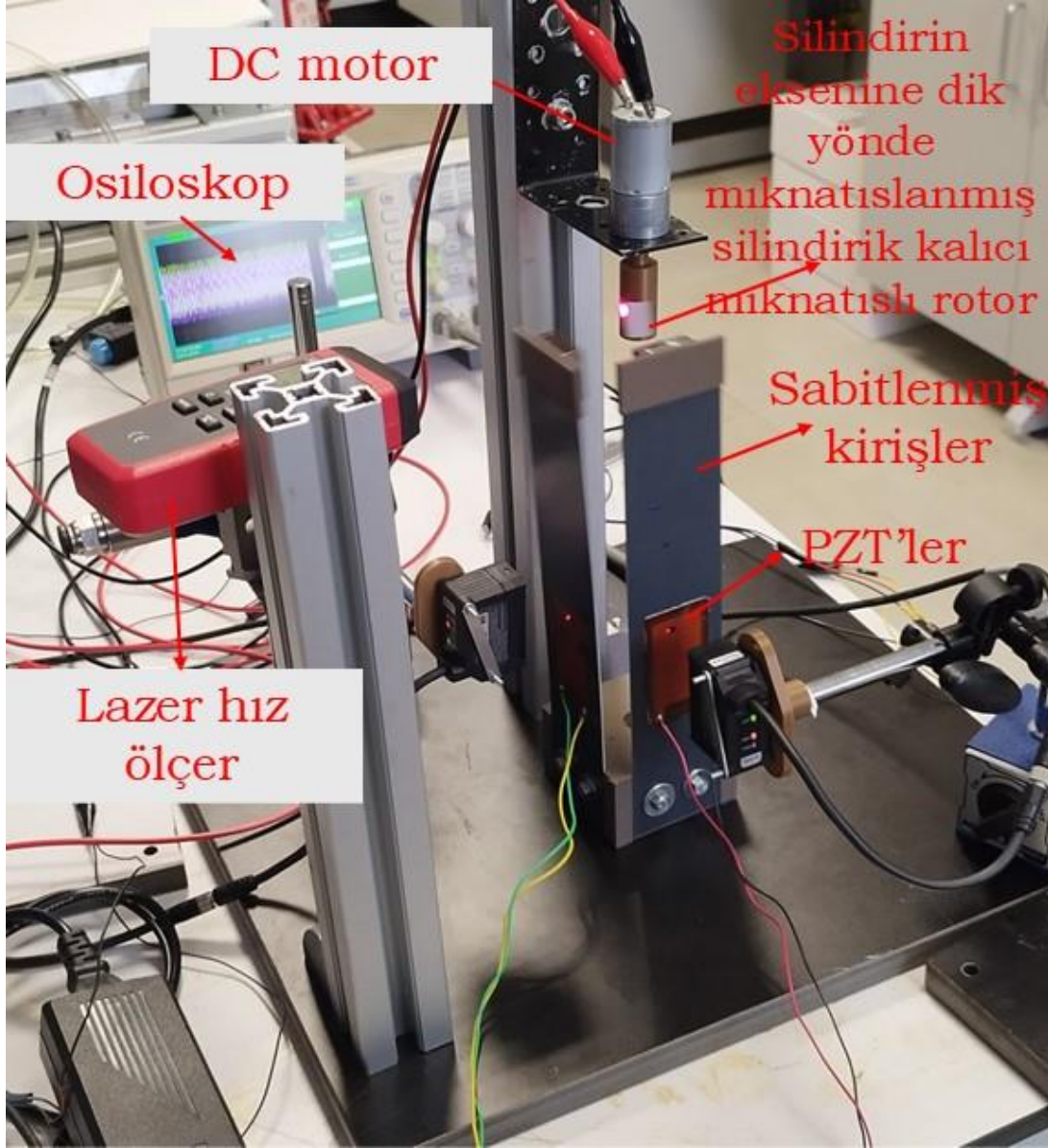
Kavramsal bir rüzgar türbini uygulamasına yönelik deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için, daha önce Şekil 4.4'te verilen düzeneğe dayanılarak deney düzeneği Şekil 4.5'te gösterildiği şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Bu yaklaşımda, sistemin merkezine yerleştirilen çapraz mıknatıslanmış silindirik bir kalıcı mıknatıs, rüzgar türbini miline monte edilmiştir. Mıknatısın dönüşü sırasında her iki kirişe de periyodik olarak manyetik kuvvet uygulanmakta, bu kuvvetle kirişlerde titreşimler oluşturularak piezoelektrik enerji üretim süreci başlatılmaktadır.



Şekil 4.5. Rüzgar yönünden bağımsız kavramsal enerji hasadı sistemi.

Bu deneysel düzeneğe gerçek bir rüzgar türbini yerine, değişken hız kontrollü bir doğru akım DC motoru Şekil 4.6'da görüldüğü gibi kullanılmıştır. Motorun türbin rotoruna bağlanması sayesinde farklı rüzgar hızları, motorun devir sayısı değiştirilerek kontrollü bir biçimde taklit edilebilmiştir. Böylece sistem, rüzgar akışının neden olacağı dönme hareketlerinin dinamik etkilerini gerçekçi biçimde simüle edebilecek hale getirilmiştir. Motor milinin dönme hızı, temassız çalışan lazer takometre aracılığıyla yüksek hassasiyetle ölçülmüş; bu sayede hem doğru hem de dış etkilerden arındırılmış veriler elde edilmiştir. Bu deneysel yapı, çift kirişli ve manyetik bağlantılı piezoelektrik enerji hasadı sisteminin rüzgar enerjisine dayalı uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermektedir. Dönel hareketin mekanik titreşimlere, bu titreşimlerin ise piezoelektrik dönüştürücüler sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülmesi, sistemin enerji dönüşüm zincirinin etkinliğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, geliştirilen bu sistem; kompakt yapısı, düşük maliyeti, yön bağımsız çalışabilirliği ve çift kaynaklı enerji hasadı yeteneği sayesinde küçük ölçekli yenilenebilir enerji sistemlerine entegrasyon açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.



Şekil 4.6. Dönen manyetik uyarımlı deneysel düzenek.

Bu çalışmada geliştirilen deney düzeneği, önerilen çift kirişli, dik manyetik bağlamalı piezoelektrik enerji hasadı sisteminin gerçek çevresel koşullarda nasıl davrandığını incelemek ve sistemin enerji dönüşüm performansını değerlendirmek için uygun bir deneysel platform sunmaktadır. Bu düzenek sayesinde, sistemin farklı uyarım türlerine verdiği tepkiler gözlemlenebilmekte, aynı zamanda piezoelektrik elemanlar aracılığıyla elde edilen elektriksel

çıktılar detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. Deneysel aşamalarda, özellikle düşük frekanslı titreşimler altında sistemin kararlılığı, enerji üretim verimliliği ve her iki kirişin dinamik etkileşimi üzerine odaklanılmıştır.

Bir sonraki bölümde, yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kapsamlı olarak sunulacak ve çeşitli açılardan analiz edilecektir. Bu kapsamda, kirişlerin zamana bağlı mekanik tepkileri ile piezoelektrik yamalar üzerinden üretilen elektriksel gerilim değerleri incelenerek sistemin enerji hasadı kapasitesi değerlendirilecektir. Ayrıca, yön bağımsızlık ilkesine dayalı bu sistemin, dışsal aerodinamik veya mekanik uyarımlara karşı tepkisi ve enerji dönüşümündeki sürekliliği de deneysel bulgular ışığında tartışılacaktır.

Elde edilen sonuçlar, dik yerleşimli manyetik bağlamının sistem üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymakta ve çift kirişli yapının, düşük frekanslı ve yön belirsiz çevresel titreşim kaynaklarından etkin bir şekilde enerji toplayabildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, önerilen sistemin hem yapısal bütünlüğü hem de performans özellikleri açısından gerçek dünya uygulamalarına uygunluğu doğrulanmakta; küçük ölçekli, yenilenebilir enerji çözümleri için umut vadeden bir alternatif sunduğu anlaşılmaktadır.

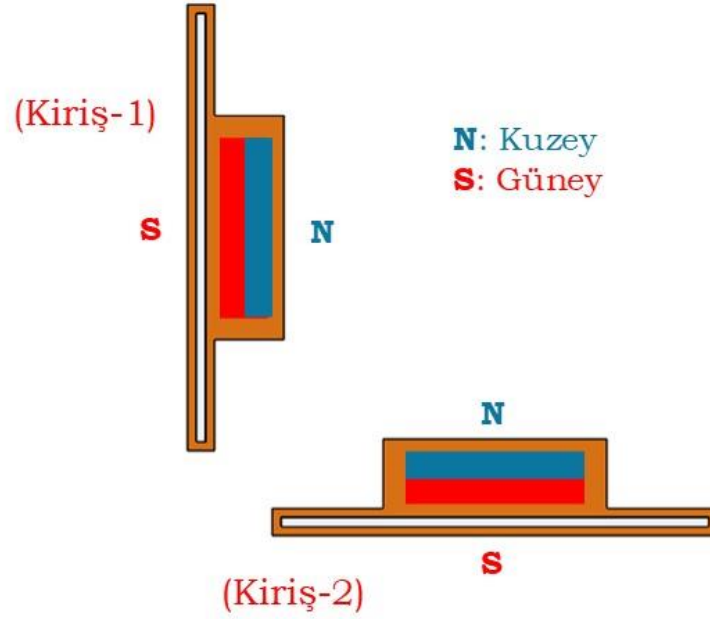
5. SONLU ELEMEANLAR ANALİZİ

Bu bölümde, önerilen enerji hasadı sistemine ait matematiksel modelin ardından, sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen magnetostatik analiz sunulmaktadır. Bu analiz kapsamında, birbirine dik konumlandırılmış iki mıknatısın etkileşimi iki boyutlu olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma, sistemde yer alan mıknatıslar arasındaki manyetik etkileşimleri daha iyi anlamayı amaçlamakta ve bu etkileşimlerin genel sistem performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmeye yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bağlamda elde edilen bulgular, enerji hasadı mekanizmasının tasarımının optimize edilmesi açısından da yol gösterici niteliktedir.

Şekil 5.1'de, sistemin üstten görünümü verilmiştir. Bu görselde, sabit mıknatısların birbirine dik yerleşimi ve manyetik kutuplaşma yönleri detaylı biçimde gösterilmiştir. Şekilde yer alan 'N' harfi mıknatısın kuzey kutbunu, 'S' harfi ise güney kutbunu temsil etmektedir. İlgili konumlandırma sayesinde, her iki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan dağılımı net bir şekilde analiz edilebilmektedir.

Analiz, iki boyutlu bir çerçevede gerçekleştirilmiş olup, bu yaklaşım sistemin fiziksel yapısını yalınlaştırarak hem hesaplama süresini azaltmakta hem de sayısal çözümün doğruluğunu korumaktadır. Bu bağlamda, analiz derinliği olarak sabit mıknatısın derinliği, esas alınmıştır. Derinliğin bu şekilde tanımlanması, üç boyutlu etkilerden kaynaklı karmaşıklıkların önüne geçerken, aynı zamanda gerçekçi ve geçerli sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, yapılan bu magnet statik analiz, önerilen enerji hasadı sisteminin performansını etkileyen temel fiziksel süreçlerden biri olan manyetik kuvvetlerin detaylı şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Bu tür analizler, sistemdeki tasarım parametrelerinin hassas bir şekilde ayarlanması, özellikle mıknatıs yerleşimi ve yönelimi gibi kritik değişkenlerin optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Böylece, enerji dönüşüm verimliliği artırılarak sistemin genel işlevselliği geliştirilebilmektedir.



Şekil 5.1. Enerji hasadı sistemine ait üst görünüm: sabit mıknatısların yerleşimi ve manyetik kutuplaşma yönleri.

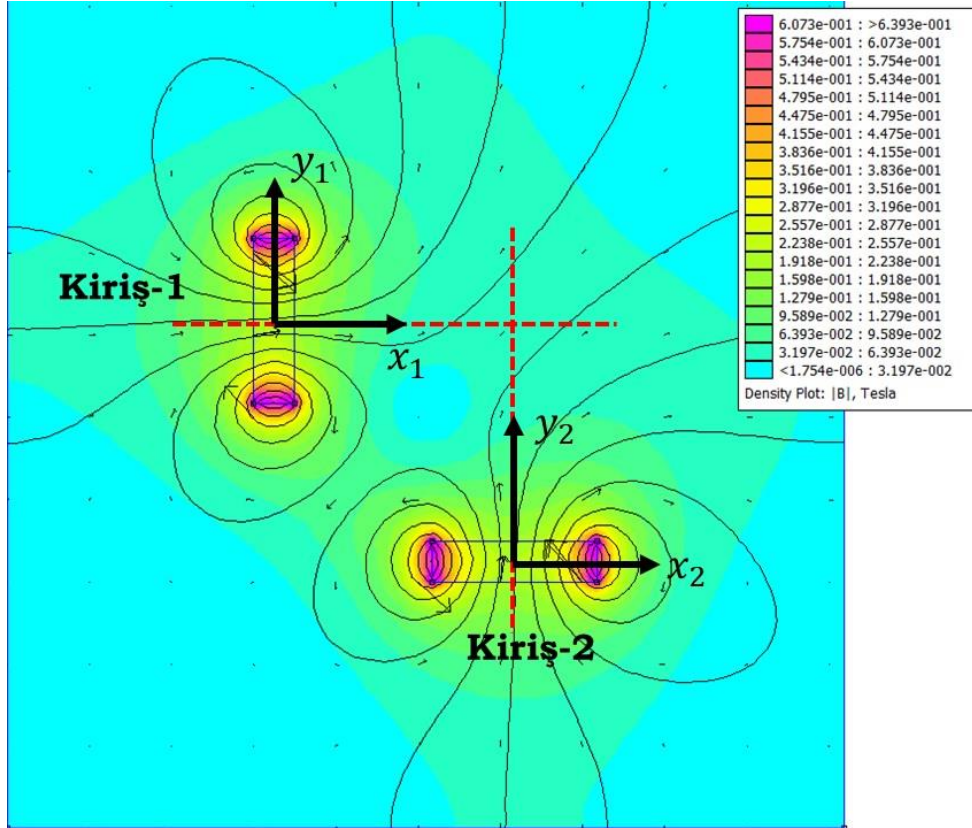
Gerçekleştirilen analizlerde, etkili iki boyutlu simülasyonlar yapmaya olanak tanıyan, güçlü ve ücretsiz lisansa sahip bir yazılım olan FEMM (Finite Element Method Magnetics) kullanılmıştır (Meeker, 2010). Şekil 5.2’de, bu çalışmada kullanılan analiz arayüzü görsel olarak sunulmaktadır. Simülasyon sürecinde problemin sadeleştirilmesi ve temel fiziksel etkileşimlerin daha net bir şekilde incelenebilmesi amacıyla birtakım varsayımlar yapılmıştır.

Özellikle, yapılan analizlerde Kiriş-2'nin sabit olduğu kabul edilmiş; Kiriş-1'in ise yalnızca kendi yerel koordinat sisteminde x_1 yönünde hareket edebileceği varsayılmıştır. Bu doğrultuda, Kiriş-1'in -10 mm ile $+10$ mm arasında salınım yaptığı, yani bu aralıkta ileri-geri hareket ettiği varsayılmıştır. Bu varsayım, piezoelektrik enerji hasadı sisteminin çalışma dinamiğini temsil eden temel hareketin modellenmesini mümkün kılmış ve analiz sürecinin hesaplamalı verimliliğini artırmıştır.

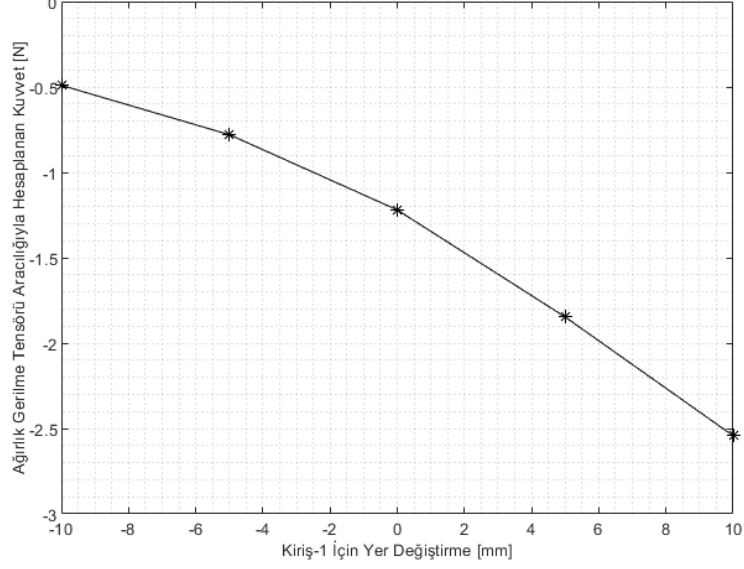
Yapılan bu düzenleme sonucunda, iki mıknatıs arasındaki etkileşimden kaynaklanan ve Kiriş-2 üzerinde etkili olan manyetik kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bu kuvvetler, sistemin çalışması sırasında meydana gelen magnetostatik etkilerin anlaşılmasına yardımcı olacak şekilde hesaplanmış ve Şekil 5.2’de görselleştirilmiştir. Şekil 5.3’te sunulan grafik, Kiriş-1’in konumuna bağlı olarak Kiriş-2 üzerinde oluşan manyetik kuvvetin nasıl değiştiğini göstermekte

ve bu kuvvetlerin enerji hasadı üzerindeki potansiyel etkilerine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Bu analizler sayesinde, sistemdeki manyetik elemanların konumlandırılması ve yönelimi gibi tasarımsal parametrelerin enerji üretimi üzerindeki rolü daha net bir biçimde ortaya konmuş, tasarım optimizasyonu açısından önemli bir temel oluşturulmuştur.



Şekil 5.2. Önerilen sistemin manyetik sonlu elemanlar yöntemi analizi.



Şekil 5.3. Kiriş-2 üzerinde etkili manyetik kuvvet.

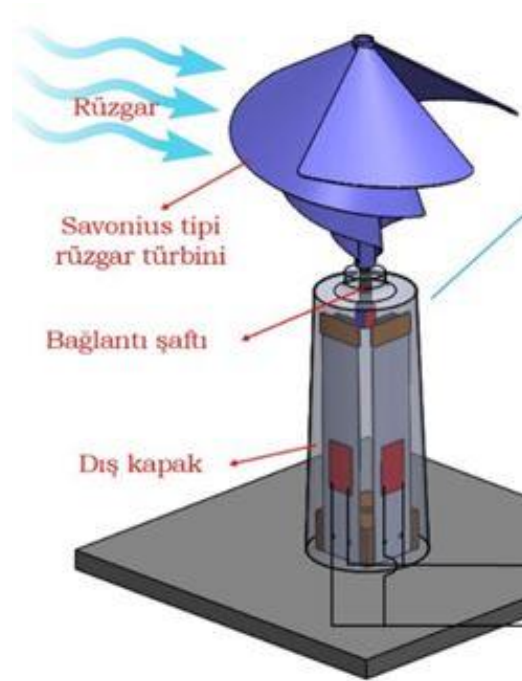
Bu analizden elde edilen bulgular ışığında, Kiriş-1'in $(x_1, y_1) = (0,0)$ konumunda tamamen hareketsiz olduğu durumlarda bile, iki kiriş arasında manyetik kuvvetlerin neden olduğu zayıf fakat anlamlı bir etkileşim gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemde bulunan kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik alanların, kirişlerin konumundan bağımsız olarak birbirleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Kiriş-1'in hareketi ise, bu manyetik kuvvetlerin şiddetini ve yönünü değiştirerek Kiriş-2 üzerinde dinamik bir etkileşim yaratmaktadır. Dolayısıyla, Kiriş-1'in salınım hareketi, Kiriş-2'nin maruz kaldığı manyetik kuvvetlerde periyodik değişimlere yol açmakta ve bu da iki kiriş arasında sürekli ve karşılıklı bir titreşim durumu oluşturur.

Bu karşılıklı etkileşim, sistemin enerji hasadı açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Çünkü dışardan gelen mekanik uyarım ne yönde olursa olsun, sistemde yer alan her iki kiriş de bu manyetik bağ sayesinde titreşim halinde kalmakta ve dolayısıyla enerji üretimine katkıda bulunmaktadır. Başka bir deyişle, sistem sadece belirli bir yönden gelen uyarımla sınırlı kalmayıp, farklı yönlerden gelen hava akımı gibi değişken koşullarda bile etkin şekilde enerji toplayabilmektedir. Özellikle deneysel çalışmalarda da doğrulanacağı üzere, sistemde sadece bir kirişin uygun bir yönde uyarılması, diğer kirişin manyetik etkileşim yoluyla harekete geçmesini sağlayarak toplam enerji hasadını mümkün kılmaktadır. Bu durum, sistemin yön bağımsızlığı özelliğini güçlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda enerji verimliliğini artırmakta

ve çevresel koşullardaki değişimlere karşı daha dayanıklı bir enerji toplama mekanizması sunmaktadır.

Sonuç olarak, manyetik etkileşimlerin getirdiği bu sürekli dinamik bağ, piezoelektrik elemanlar tarafından üretilen enerjinin sürekliliği ve kararlılığı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sistem tasarımında bu etkileşimlerin dikkate alınması hem mekanik hem de manyetik parametrelerin optimize edilmesiyle, enerji hasadı kapasitesinin en üst seviyeye çıkarılmasına olanak tanımaktadır. Böylece, çok yönlü ve değişken çevresel koşullarda çalışabilen, daha güvenilir ve verimli bir enerji toplama sistemi geliştirilmiş olmaktadır.

Bir diğer çalışmada önerilen enerji hasadı sistemi, çift kirişler arasında bulunan dikey manyetik bağlama mekanizması ile karakterize edilmekte olup, aynı zamanda bu yapının potansiyel bir uygulama örneği olarak kavramsallaştırılması mümkün olmaktadır. Şekil 5.4'te sunulan konfigürasyonda, sisteme entegre edilen Savonius tipi bir rüzgar türbini yer almaktadır. Bu türbin, düşük ve değişken hızlardaki rüzgar koşullarında dahi etkili enerji üretimi sağlayabilmesi nedeniyle özellikle yenilenebilir enerji uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 5.4. Savonius tipi bir rüzgâr türbini ile çalışan enerji hasadı sisteminin şematik gösterimi.

Söz konusu konfigürasyonda, rüzgâr türbinine bağlı rotor, diyametik olarak mıknatıslanmış silindirik bir kalıcı mıknatısla donatılmıştır. Bu mıknatıs, rotasyon hareketi sırasında döner manyetik alan oluşturarak, çift kiriş üzerindeki manyetik kuvvetlerin eş zamanlı ve simetrik bir şekilde harekete geçirilmesini sağlamaktadır. Böylece, mekanik enerji manyetik etkileşimler aracılığıyla iki kirişe iletilmekte ve piezoelektrik elemanlar tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

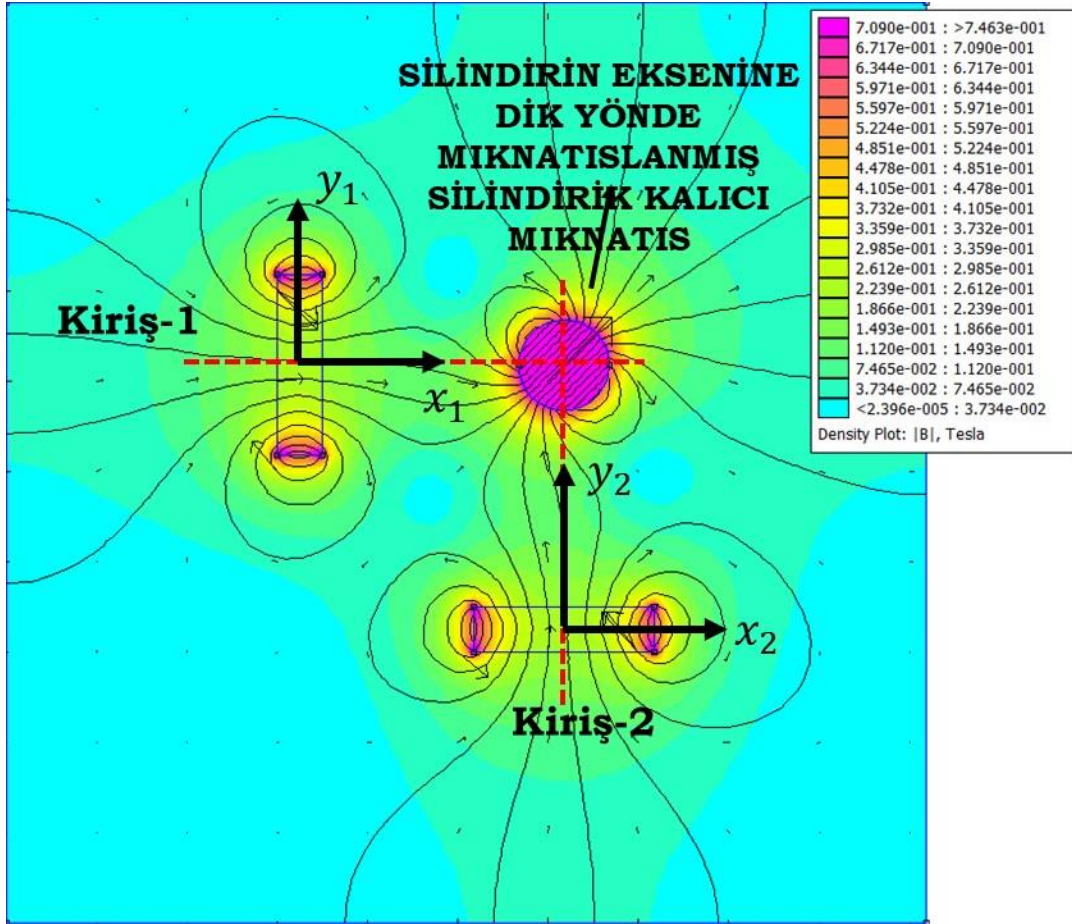
Bu sistemin en önemli avantajlarından biri, enerji hasadının rüzgârın yönünden bağımsız olarak gerçekleşmesidir. Geleneksel enerji toplama mekanizmalarında, rüzgar yönü değişiklikleri performans olumsuz etkileyebilirken, burada manyetik bağlama yapısı sayesinde sistem, rüzgârın herhangi bir yönden esmesine rağmen sürekli ve stabil enerji üretimini sürdürebilmektedir. Bu yön bağımsızlığı, özellikle rüzgar yönünün sabit olmadığı, çeşitli hava koşullarının hakim olduğu açık alanlarda büyük bir pratik değer taşımaktadır.

Ayrıca, bu yöntem elektrik şebekesinden bağımsız bölgelerde enerji ihtiyacını karşılamak için uygun, sürdürülebilir ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Ulaşılması güç veya altyapının yetersiz olduğu alanlarda, bu tür bağımsız enerji üretim sistemleri, hayat kalitesini artırmak ve sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik etmek açısından kritik önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, önerilen sistem, manyetik bağlama ve piezoelektrik enerji hasadını birleştirerek, pratik uygulamalar için sağlam bir temel oluşturmakta ve bağımsız enerji üretimi alanında yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. İleriye dönük çalışmalarda, bu tür sistemlerin farklı türbin modelleri ve enerji dönüştürme elemanları ile entegrasyonu incelenerek, enerji verimliliğinin artırılması ve uygulama alanlarının genişletilmesi hedeflenmektedir.

Dönel manyetik kuvvetlerin kirişler üzerindeki etkisi, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilen ek bir analizle daha Şekil 5.5'te ki grafikte olduğu gibi incelenmiştir. Bu konfigürasyon için geliştirilen FEM modelini göstermektedir. Analizde, sabit mıknatısların her ikisinin de $(x_1, y_1) = (0,0)$ ve $(x_2, y_2) = (0,0)$ konumlarında hareketsiz olduğu varsayılmıştır. Buna karşın, rotor üzerinde bulunan diyametik olarak mıknatıslanmış silindirik kalıcı mıknatısın tam bir 360 derece dönüş yaptığı kabul edilmiştir.

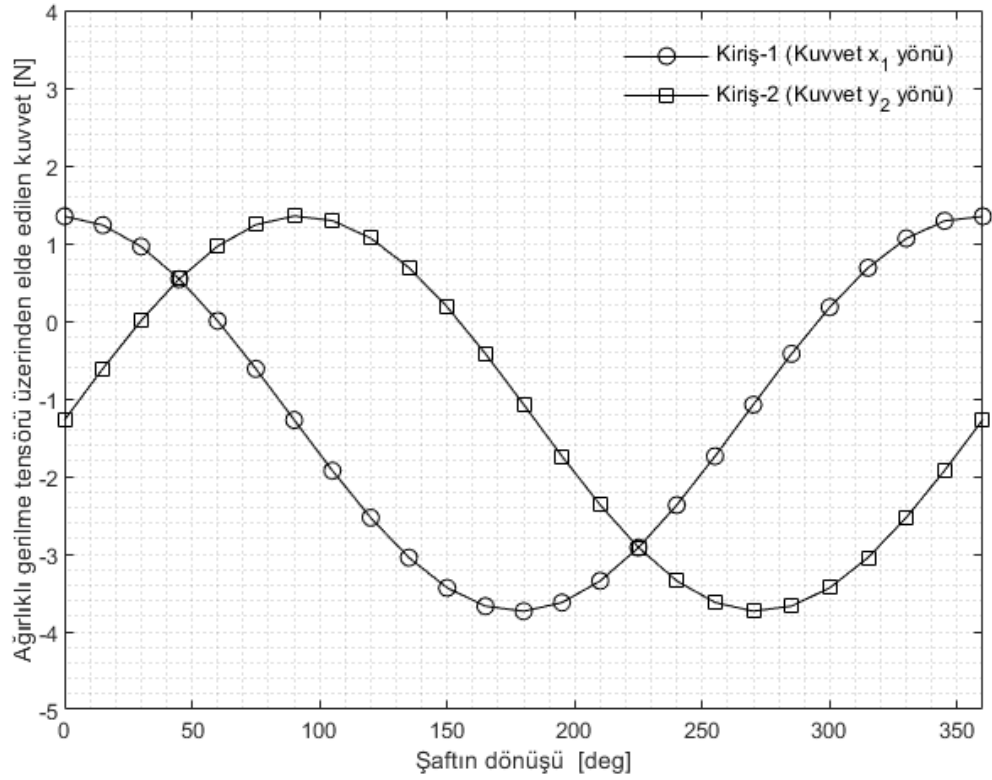
Bu varsayımlar doğrultusunda yapılan simülasyonlar, dönel manyetik alanların kirişler üzerindeki dinamik etkilerini ve ortaya çıkan manyetik kuvvetlerin zamana bağlı değişimini ortaya koymaktadır. Böylece, rotorun dönüş hareketiyle oluşturulan manyetik etkileşimlerin, enerji hasadı sisteminin performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin çalışma prensiplerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamanın yanı sıra, tasarımın optimize edilmesi için de önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 5.5. Döner manyetik kuvvet durumuna ilişkin sonlu elemanlar yöntemi manyetik analiz modeli.

Şekil 5.6, rotorun tam bir dönüş döngüsü sonucunda Kiriş-1 ve Kiriş-2 üzerinde etkili olan manyetik kuvvet değerlerini göstermektedir. Bu analizden elde edilen bulgulara göre, tek bir döner manyetik uyarım, her iki kiriş elemanında da etkin titreşimlerin oluşmasını sağlamaktadır; ancak kirişler arasında belirli bir faz farkı mevcuttur. Bu faz farkı, sistemin yapısal düzeni ve manyetik etkileşimlerin doğasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, dönen manyetik alan gibi sürekli değişken bir uyarım kaynağına rağmen, her iki kirişin de kararlı ve sürekli bir salınım durumunda kalmaya devam ettiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji hasadı sisteminin dinamik davranışının sürekliliğini ve etkinliğini desteklemekte olup, sistemin farklı çalışma koşullarında da verimli bir performans sergilemesine olanak tanımaktadır.



Şekil 5.6. Kiriş-1 ve Kiriş-2 üzerinde etkili döner manyetik kuvvetler.

Bu bulgu, enerji hasadı uygulamaları için son derece önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Sistem, mekanik titreşim üretimini doğrudan dönel manyetik kuvvetler aracılığıyla sağlamaktadır; böylece, mekanik hareketin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gerekli titreşimlerin etkin ve verimli bir biçimde ortaya çıkmasını mümkün kılmaktadır. Bu dönüşümün etkinliği, enerji üretiminde süreklilik ve kararlılık açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bunun yanı sıra, bu enerji hasadı mekanizmasının temel uyarım prensibi olarak dönen manyetik alanı kullanması, sistemin doğrudan mekanik temas gerektirmemesinden

kaynaklanan önemli avantajlar sunmaktadır. Mekanik temasın ortadan kalkması, aşınma ve yıpranmanın büyük ölçüde azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, sistemin uzun ömürlü olmasını desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda bakım sıklığını ve bakım maliyetlerini de önemli ölçüde düşürmektedir. Böylece, saha uygulamalarında operasyonel maliyetlerin minimize edilmesi ve sistem güvenilirliğinin artırılması mümkün olmaktadır.

Bu bağlamda, yapılan analizler ve elde edilen deneysel veriler, önerilen enerji hasadı sisteminin rüzgâr yönünden bağımsız olarak çalışabileceğini güçlü bir şekilde doğrulamaktadır. Sistem, değişken ve öngörülemez çevresel koşullara rağmen istikrarlı bir enerji üretimi sunabilmektedir. Bu da özellikle rüzgârın yönünün sabit olmadığı ya da sık sık değiştiği doğal ortamlar için büyük bir avantaj teşkil etmektedir.

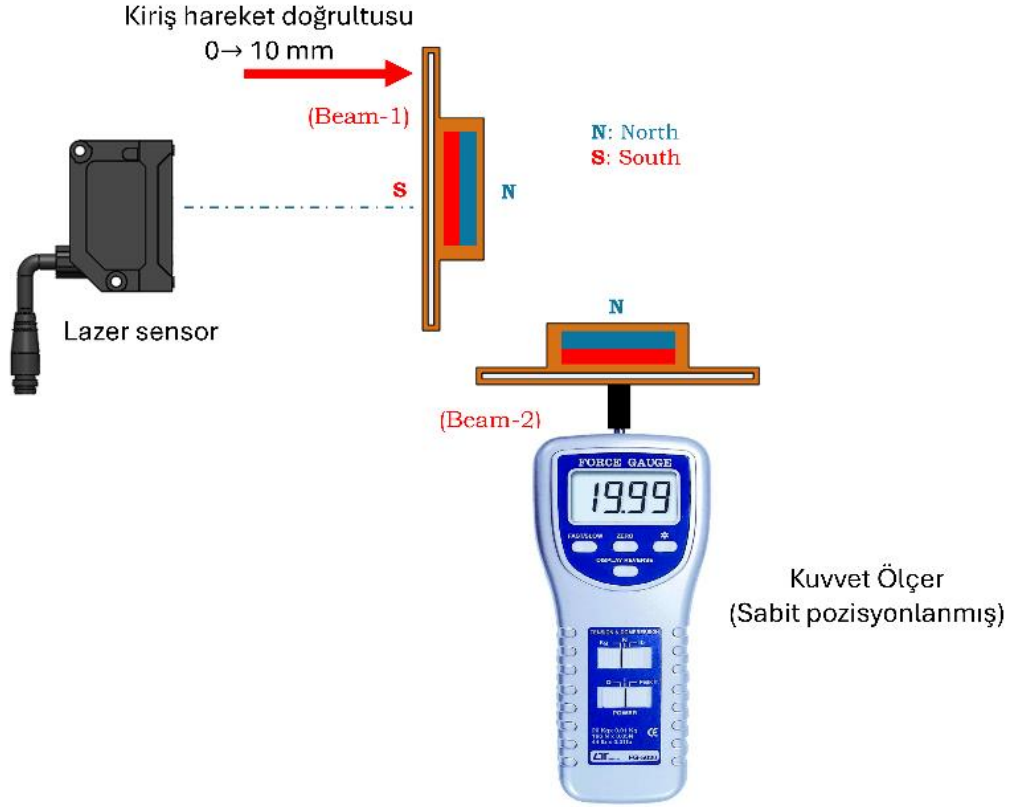
Önerilen konfigürasyon, dayanıklılığı, adaptasyon kabiliyeti ve yön bağımsızlığı gibi özellikleriyle, şebekeden bağımsız ve uzak bölgelerdeki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu tür bölgelerde geleneksel enerji altyapısının kurulması hem maliyetli hem de lojistik açıdan zorlayıcı olabilir; dolayısıyla, bu sistem gibi yenilikçi ve sürdürülebilir enerji üretim mekanizmaları, yerel enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma açısından önemli fırsatlar yaratmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, enerji hasadı alanında manyetik etkileşimlerin kullanılması yoluyla yüksek performanslı, uzun ömürlü ve bakım gereksinimi düşük sistemlerin geliştirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. İleriye dönük araştırmalar, bu tür manyetik enerji hasadı sistemlerinin farklı tasarım parametreleri, malzeme özellikleri ve uygulama alanları çerçevesinde optimize edilmesi yönünde ilerleyerek, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasına katkıda bulunabilir.

5.1. Deneysel Kuvvet Ölçümü

Yapılan sonlu elemanlar analizinin doğrulanması adına deneysel enerji hasadı sistemi üzerinde kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7’de kuvvet ölçümü için yapılan deneysel çalışma düzeni şematik olarak sunulmuştur. Burada kiriş-1 harici bir kuvvet yardımı Şekil 5.7 üzerinden de görüleceği üzere ileri yöne doğru hareket ettirilmiş ve uç kısmına yerleştirilen sabit mıknatısın 0-10 mm hareketi bir lazer sensör yardımı ile ölçülmüştür. Kiriş-2 ise Lutron

FG-5020 kuvvet sensörü yardımı ile sabit bir şekilde konumlandırılarak kiriş-1'in hareketi sonucunda üzerine etki eden kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Deneysel kuvvet ölçümü için kullanılan düzeneğin şematik görünüşü.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, çift ankastre kirişli, manyetik uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sistemine ait deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen bulgular detaylı bir biçimde sunulmaktadır. Geliştirilen deney düzeneği aracılığıyla sistemin dinamik davranışları gözlemlenmiş; piezoelektrik yamalardan elde edilen elektriksel çıktılar ve kiriş hareketlerine ait zamana bağlı tepkiler kaydedilerek analiz edilmiştir. Deneysel süreçte hem doğrudan aerodinamik uyarım hem de döner bir sistem üzerinden sağlanan manyetik uyarım senaryoları değerlendirilmiş, bu sayede sistemin farklı çalışma koşullarındaki performansı kapsamlı biçimde incelenmiştir.

Yapılan ölçümler, özellikle düşük frekanslı çevresel titreşimler altında sistemin enerji dönüşüm kabiliyetini değerlendirmeyi amaçlamış; çift kiriş yapısının birbirini etkileyen hareketleri ve manyetik bağlamanın katkıları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda elde edilen gerilim çıktıları, zaman ve frekans alanlarında analiz edilerek sistemin enerji üretim verimliliği ortaya konmuştur. Aynı zamanda, sistemin yön bağımsız çalışabilirliği ve çoklu enerji kaynağına eşzamanlı yanıt verebilme kapasitesi de deneysel veriler doğrultusunda değerlendirilmektedir.

Deneysel çalışmaların takibini kolaylaştırmak amacıyla, bu bölümde yürütülen deneyler üç ana başlık altında sistematik şekilde ele alınmıştır. İlk olarak, dik açılı manyetik dipol etkileşimli çift kiriş sistemine pnömatik hava üfleme yöntemiyle uygulanan uyarımın etkilerini inceleyen deneysel çalışmalar detaylı biçimde aktarılmıştır. Bu aşamada, sistemin pnömatik hava akımı ile nasıl titreştiği, manyetik etkileşimlerin titreşim davranışına olan katkısı ve piezoelektrik enerji hasadı performansı üzerinde durulmuştur.

İkinci bölümde ise, rüzgâr yönünden bağımsız çalışan çok yönlü hava akımı uyarımının sistem üzerindeki etkileri ve elde edilen deneysel sonuçlar paylaşılmıştır. Bu kısımda, sistemin farklı yönlerden gelen hava akımlarına karşı gösterdiği tepkiler ve yön bağımsız enerji toplama kapasitesi detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Son olarak, geliştirilen enerji hasadı mekanizmasının gerçek dünya uygulamalarında ne derece etkili ve uygulanabilir olduğunu göstermek amacıyla bir prototip üzerinde yapılan deneysel testlerin sonuçları sunulmuştur. Bu uygulama örneği, tasarımın pratik kullanım

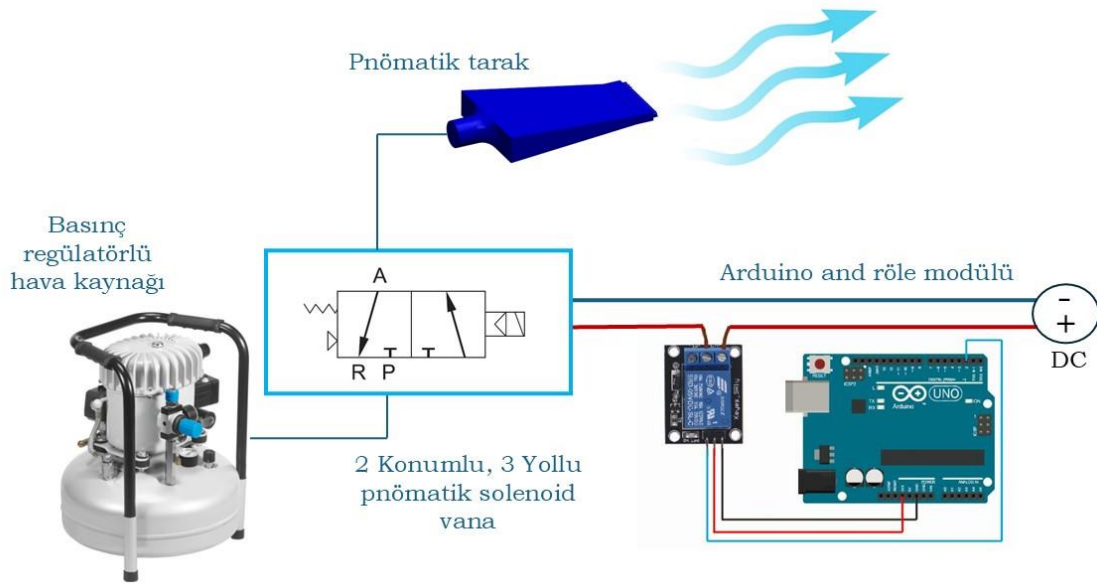
potansiyelini ortaya koymakta ve enerji hasadı sisteminin endüstriyel veya çevresel koşullarda nasıl performans gösterebileceğine dair önemli veriler sağlamaktadır.

6.1. Pnömatik Hava Üfleme Uyarımı Deneysel Sonuçları

Deneysel sistemde, piezoelektrik yamalar aracılığıyla mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla sıkıştırılmış hava kullanılmıştır. Bu kapsamda, mekanik titreşimlerin oluşturulması ve kontrolü için pnömatik bir hava akımı sistemi tasarlanmıştır. Sıkıştırılmış hava, pnömatik hava tarağı şeklinde özel olarak tasarlanmış bir nozul yardımıyla, deney düzeneğinde yer alan ve enerji hasadı yapılacak kirişe yönlendirilmiştir. Hava akımının hedeflenen kiriş üzerine etkili ve kontrollü bir şekilde uygulanabilmesi için hava basıncı kritik bir parametre olarak ele alınmıştır.

Bu amaçla, hava kompresörünün çıkış basıncı, hassas bir şekilde ayarlanabilen bir basınç regülatörü kullanılarak 2 bar ile sınırlandırılmıştır. Bu sayede, kirişe uygulanan hava basıncı istenilen seviyede tutulmuş ve aşırı basınç kaynaklı olası sistem hasarlarının önüne geçilmiştir. Ayrıca, pnömatik sistemdeki hava akışının kontrollü bir şekilde yönlendirilmesi ve kesilmesi amacıyla, 24V DC ile çalışan, 2 konumlu ve 3 yollu bir pnömatik elektromanyetik vana kullanılmıştır. Bu vana, deney sürecinde hava akımının açma-kapama işlemlerini hassas ve hızlı şekilde gerçekleştirebilmekte, böylece deney koşullarının tekrar edilebilirliğini sağlamaktadır.

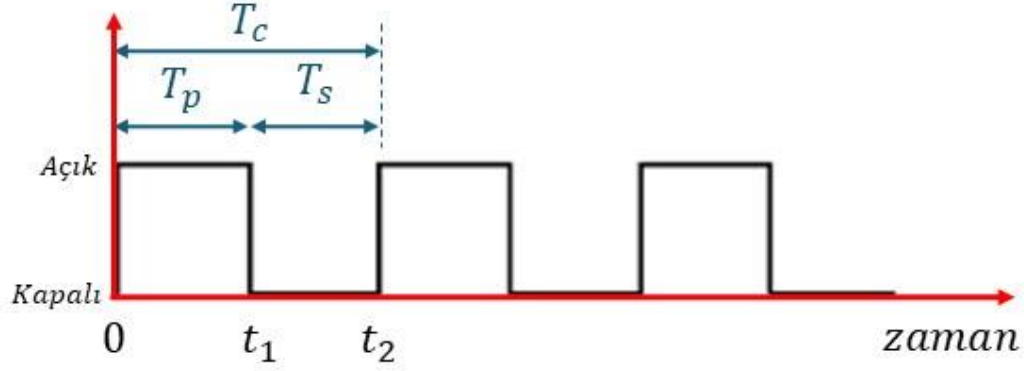
Pnömatik hava akımı mekanizmasının genel yapısı ve çalışma prensipleri, Şekil 6.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu şema, sistemdeki temel bileşenlerin konumlarını ve birbirleriyle olan etkileşimlerini açıkça ortaya koymaktadır. Söz konusu düzenek, piezoelektrik yamaların mekanik uyarımı için gerekli olan hava akışını etkili ve kontrollü biçimde sağlayarak, deneysel çalışmaların sağlıklı ve güvenilir bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 6.1. Pnömatik hava üfleme mekanizmasının şematik gösterimi.

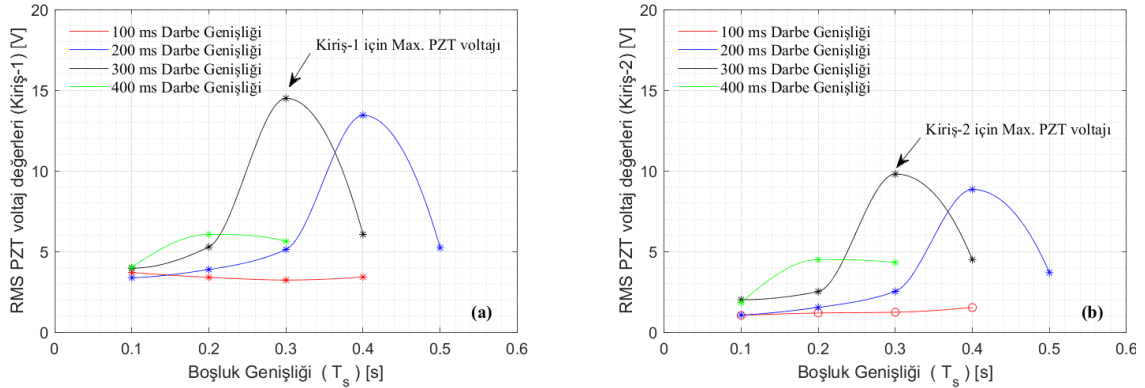
Solenoid valfin belirli zaman aralıklarında ve kontrollü şekilde çalışabilmesi için deneysel sistemde 24V DC beslemeli bir röle modülü ile Arduino UNO geliştirme kartı entegre edilmiştir. Bu donanım bileşenleri, solenoid valfin açma-kapama işlemlerini otomatik olarak yönetmek amacıyla kullanılmıştır. Arduino kartına yazılan özel program kodu sayesinde, valfin açık kalma süresi (darbe genişliği) ve kapalı kalma süresi (boşluk genişliği) hassas bir biçimde ayarlanabilmiş; bu sayede hava üfleme işleminin giriş üzerine uygulanma süresi ve aralığı tam kontrol altında tutulmuştur.

Sistem, valfin açılma ve kapanma periyotlarını net olarak belirleyerek, deneylerde istenen tekrar edilebilirlik ve doğruluk sağlanmasını mümkün kılmıştır. Bu da enerji hasadı sırasında mekanik uyarımın kesin zamanlamayla uygulanmasını ve verilerin tutarlılığını artırmıştır. Şekil 6.2’de sunulan çevrim zamanı (T_c), solenoid valfin açık ve kapalı kalma sürelerini görsel olarak ifade etmektedir. Burada T_p , valfin açık kaldığı süreyi yani darbe genişliğini; T_s ise valfin kapalı kaldığı süreyi yani boşluk genişliğini göstermektedir.



Şekil 6.2. Çevrim zamanının gösterimi.

Bu kontrol mekanizması, deney sırasında hava akışının periyodik ve kontrollü olarak kırıslara uygulanmasını sağlamış; böylece piezoelektrik yamalar tarafından üretilen elektriksel çıktının düzenli ve güvenilir bir biçimde ölçülmesine olanak tanımıştır. Ayrıca, Arduino tabanlı bu sistemin esnekliği sayesinde farklı deney koşullarına uygun zamanlama parametreleri kolayca ayarlanabilmiş, deney protokolünün ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Darbe Genişliği ve Boşluk Genişliği Sürelerinin Belirlenmesi: (a) Kiriş-1 (b) Kiriş-2.

Farklı darbe genişliği (T_p) ve boşluk genişliği (T_s) süreleri kullanılarak sistemin performansı incelenmiş ve böylece optimal değerler belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, piezoelektrik elemanın en yüksek gerilim çıktısını ürettiği zaman aralıkları tespit edilmiştir. Şekil 6.3'te, farklı darbe genişliği değerleri için kırış-1 ve kırış-2'de elde edilen enerji hasadı gerilimleri sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, elde edilen enerji en yüksek değerine $T_p = 0,3$ saniye ve $T_s = 0,3$ saniye (toplam çevrim süresi $T_c = 0,3$ saniye) olduğunda ulaşmaktadır.

Bu süreç, sistemde enerji hasadını maksimize eden görev döngüsünün belirlenmesini kapsamaktadır. Dolayısıyla, yapılan deneylerde bu seçilmiş parametreler temel alınarak enerji hasadı performansı değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, sistemin çalışma verimliliğini artırmak ve piezoelektrik yamaların elektriksel çıkışını optimize etmek amacıyla kritik öneme sahiptir. Elde edilen sonuçlar, belirlenen optimal zamanlama parametrelerinin sistemin enerji üretim kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

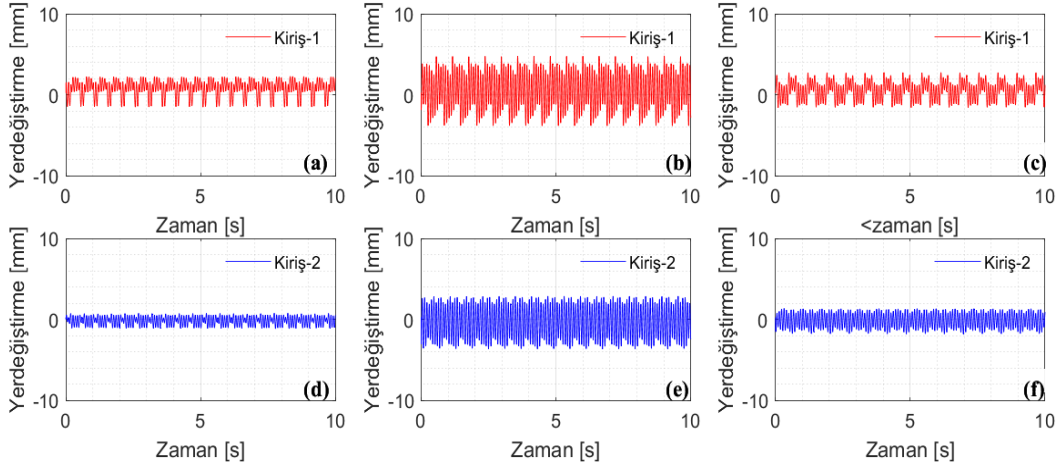
Seçilen darbe genişliği (T_p) değerinin sistem üzerindeki etkisini daha kapsamlı bir şekilde incelemek amacıyla, farklı boşluk genişliği (T_s) değerlerinde kaydedilen kirişlerin zamana bağlı yer değiştirme değerleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu analiz, Kiriş-1 ve Kiriş-2 için karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Yer değiştirme ölçümleri, sistemde kullanılan temassız lazer sensörleri vasıtasıyla yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiş olup, titreşim genliği ve hareket dinamikleri hakkında önemli bilgiler sağlamıştır. Bu sayede, farklı T_s değerlerinin kirişlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisi net bir şekilde ortaya konmuştur.

Aynı şekilde, farklı T_p değerleri için piezoelektrik yamalar tarafından toplanan elektriksel gerilimler de zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve Şekil 6.4'te Kiriş-1 ve Kiriş-2 için karşılaştırmalı grafikler halinde sunulmuştur. Bu grafikler, darbe genişliğinin enerji üretimi üzerindeki kritik rolünü gözler önüne sermekte ve optimum T_p değerinin belirlenmesi sürecine ışık tutmaktadır. Şekil 6.4'ün (b) ve (e) kısımları ile Şekil 6.5'in (b) ve (e) kısımlarında açıkça görüldüğü üzere, belirlenen zaman aralığı hem kirişlerin titreşim genliğini hem de elde edilen elektriksel enerjiyi maksimum seviyeye çıkarmaktadır.

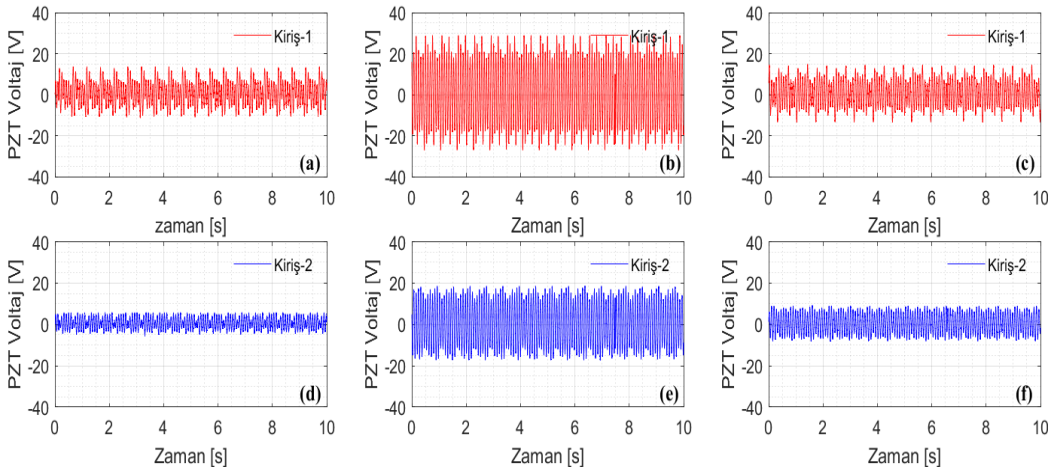
Pnömatik tarak nozulu ile oluşturulan hava akımı doğrudan Kiriş-1 üzerine yönlendirilirken, sistemde kullanılan özel manyetik bağlama mekanizması sayesinde Kiriş-2, hava akımı yönünde olmamasına rağmen manyetik kuvvetler aracılığıyla uyarılmakta ve titreşim yapmaktadır. Bu manyetik etkileşim, Kiriş-2'nin piezoelektrik yaması vasıtasıyla enerji üretmesini mümkün kılmaktadır. Böylece, çift kirişli sistem sadece doğrudan mekanik uyarı alan kirişle sınırlı kalmayıp, dolaylı yoldan manyetik coupling sayesinde ikinci kirişin de enerji hasadına katkıda bulunmasını sağlamaktadır.

Bu durum, sistemin enerji hasadı verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda farklı yönlerden gelen enerji kaynaklarının etkin kullanımına olanak tanıyan esnek ve yön bağımsız

bir yapıyı da ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, manyetik coupling sistemi hem titreşim genliğinin artırılması hem de çift kirişin eş zamanlı enerji üretimi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Elde edilen bu bulgular, piezoelektrik enerji hasadı alanında yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir ve ileri uygulamalarda küçük ölçekli yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılma potansiyelini göstermektedir.



Şekil 6.4. Sistemin Yer Değiştirme Sonuçları: (a) Beam-1: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.2$ s (b) Beam-1: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.3$ s (c) Beam-1: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.4$ s (d) Beam-2: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.2$ s (e) Beam-2: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.3$ s (f) Beam-2: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.4$ s.



Şekil 6.5. Sistemin piezoelektrik voltaj üretimi: (a) Beam-1: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.2$ s (b) Beam-1: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.3$ s (c) Beam-1: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.4$ s (d) Beam-2: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.2$ s (e) Beam-2: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.3$ s (f) Beam-2: $Tp = 0.3$ s, $Ts = 0.4$ s.

Bu çalışmada, akış yönü referans olarak 0 derece kabul edilmiş ve farklı çevrim süreleri

için elde edilen deneysel veriler, $T_p = 0,3$ s sabitlenmişken hesaplanan RMS gerilim değerleri şeklinde Tablo 2’de özetlenmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde, pnömatik hava tarağının 0 derece konumunda doğrudan Kiriş-1 üzerine etki ettiği açıkça görülmektedir. Bu durumda, sistemin piezoelektrik elemanında meydana gelen mekanik gerilme artmakta ve buna bağlı olarak elektriksel gerilim üretimi de doğrudan etkilenmektedir.

Ancak, tasarlanan deneysel sistemin en önemli özelliklerinden biri, hava tarağının konumlandırıldığı açının ayarlanabilir olmasıdır. Bu özellik sayesinde sistem yalnızca belirli bir yönden gelen hava akımına bağımlı kalmaksızın çalışabilmektedir. Başka bir deyişle, hava akımının yönü değişse bile, mekanizmanın işlevselliği korunmakta ve enerji hasadı sürekli olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, sistemin rüzgâr yönünden bağımsız bir şekilde çok yönlü çalışabilmesini sağlayarak, gerçek çevresel koşullarda daha verimli ve esnek bir enerji toplama yeteneği kazandırmaktadır.

Tablo 6.1. Farklı çevrim sürelerine göre kiriş yer değiştirmeleri ve hasat edilen gerilim değerlerinin RMS (Kök ortalama kare) karşılaştırması.

	Yer Değiştirmelerin RMS Değerleri[mm]		PZT Geriliminin RMS Değerleri [V]	
	Kiriş-1	Kiriş-2	Kiriş -1	Kiriş -2
Çevrim süresi (T_c) = 0.5 s	1.2444	0.5281	5.7401	2.7260
Çevrim süresi (T_c) = 0.6 s	2.3186	1.9704	15.7526	10.6496
Çevrim süresi (T_c) = 0.7 s	1.2191	0.8809	6.5824	4.8817

Geleneksel enerji hasadı mekanizmaları, genellikle yalnızca belirli bir yönden gelen rüzgâr veya hava akımı etkisini yakalayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu tür sistemlerde, rüzgâr yönünde meydana gelen değişiklikler, sistem performansını doğrudan etkileyebilmekte ve enerji verimliliğinde önemli düşümlere neden olabilmektedir. Bu sınırlamayı ortadan kaldırmak amacıyla, bu çalışmada yön bağımsız çalışabilen yeni bir enerji hasadı sistemi tasarlanmış ve deneysel olarak test edilmiştir. Önerilen sistem, birbirine dik olarak konumlandırılmış ve uç kısımlarında miktatsız kütleler bulunan iki piezoelektrik kirişten oluşmaktadır. Bu özgün tasarım sayesinde, sistemin farklı yönlerden gelen hava akımlarına

tepki verebilmesi ve buna bağlı olarak sürekli enerji üretimi yapabilmesi hedeflenmiştir.

şekil 4.2'de de görülebileceği üzere, pnömatik hava tahrik sistemi, Kiriş-1'e göre 0 derece ekseninde hizalanmış durumdadır. Diğer yandan, aynı hava akımı, Kiriş-2'ye dik bir açıyla, yani 90 derece konumunda etki etmektedir. Bu yerleşim sayesinde, doğrudan uyarılan Kiriş-1'in titreşimi, sistemdeki manyetik etkileşim yoluyla Kiriş-2'yi de dolaylı olarak uyarmakta ve her iki kirişte de piezoelektrik gerilim üretimi gerçekleşmektedir. Bu durum, sistemin yön bağımsız çalışabilme yeteneğinin temel dayanağını oluşturmaktadır.

Sistemin farklı yönlerden gelen hava akımlarına karşı tepkisini ve bu durumun piezoelektrik gerilim çıktısına etkisini incelemek amacıyla, pnömatik hava uyarım açısı 0 dereceden 90 dereceye kadar artırılarak bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, uyarım açısı her seferinde belirli aralıklarla değiştirilmiş ve her aı için Kiriş-1 ve Kiriş-2'den elde edilen piezoelektrik RMS gerilim değerleri kayıt altına alınmıştır. Elde edilen bulgular şekil 6.6'da sunulmuştur.

şekil 6.6'da ki sonuçlar dikkatlice incelendiğinde, 0 derece konumunda Kiriş-1 tarafından elde edilen RMS gerilim değerinin, 90 derece konumunda Kiriş-2 tarafından elde edilen RMS gerilim değeri ile oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bu durum, her iki kirişin de aynı geometrik ve yapısal özelliklere sahip olmasına rağmen, sistemin farklı yönlerden gelen uyarılara karşı eşdeğer elektriksel yanıt verebildiğini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, piezoelektrik enerji hasadı süreci yalnızca tek bir yöne bağımlı kalmadan her yönden gelen akımla etkin şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

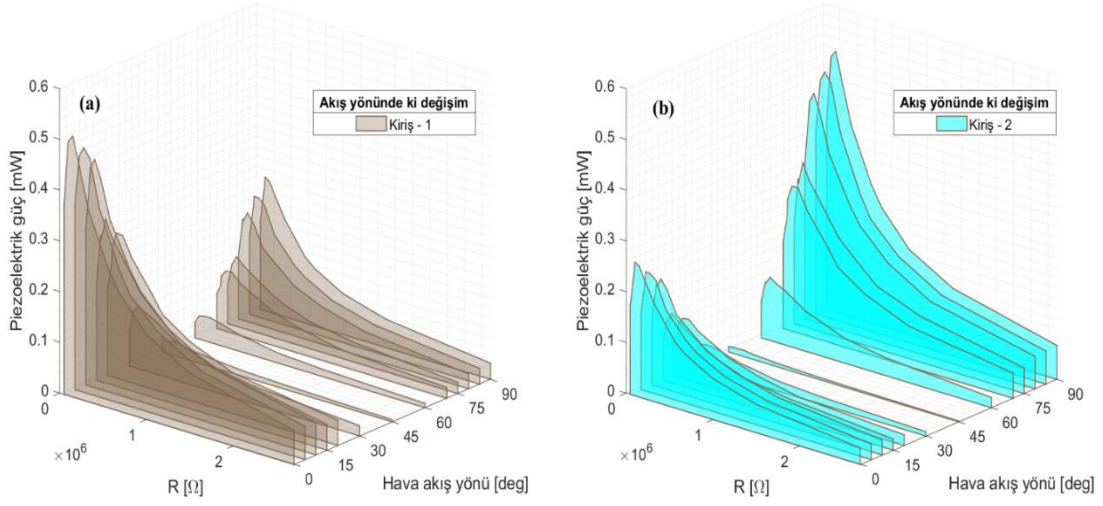
Sonuç olarak, bu deneysel çalışma, önerilen iki kirişli ve manyetik uç kütleli sistemin yön bağımsız enerji hasadı gerçekleştirme potansiyelini açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu tür sistemlerin, özellikle rüzgâr yönünün sıkça değiştiği açık alan uygulamalarında veya düzensiz akış koşullarında yüksek verimle çalışabilen, sürdürülebilir ve esnek enerji çözümleri sunabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.6. Hava üfleme yönüne göre kirişler tarafından elde edilen RMS gerilim değerlerindeki değişim.

Kirişe bağlı piezoelektrik eleman, kirişte oluşan mekanik titreşimleri elektrik enerjisine dönüştürerek enerji üretir. Piezoelektrik eleman tarafından elde edilen gerilim (V), bir elektriksel yük (R_{pzt}) üzerine uygulandığında elde edilen güç denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Power_{pzt} = \frac{V^2}{R} \quad (6.1)$$



Şekil 6.7. Farklı elektriksel yük durumlarında, hava üfleme yönünün piezoelektrik enerji üretimindeki değişime etkisi.

Bu çalışmada, piezoelektrik enerji hasadı sisteminin farklı yönlerden gelen hava akımına karşı tepkisini daha ayrıntılı olarak değerlendirebilmek amacıyla, sistem çeşitli elektriksel dirençler altında test edilmiştir. Deneysel analizler, hava akımı yönü 0 dereceden başlayarak 90 dereceye kadar çeşitli açılarda uygulanmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir hava üfleme yönü için farklı elektriksel yükler kullanılarak, piezoelektrik elemanların ürettiği güç değerleri kaydedilmiş ve analiz edilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda, Kiriş-1 ve Kiriş-2'ye ait güç eğrileri ayrı ayrı çıkarılmış ve Şekil 6.7'de görselleştirilmiştir. Şekil 6.7(a)'da, hava üfleme açısı 0 derece olarak ayarlandığında maksimum uyarımın doğrudan Kiriş-1 üzerine uygulandığı açıkça görülmektedir. Bu durumda, pnömomatik hava tarağı, Kiriş-1'in mekanik titreşimini doğrudan artırarak piezoelektrik malzemede daha yüksek elektriksel çıktı üretimine yol açmaktadır.

Buna karşılık, hava akımının yönü 90 dereceye çevrildiğinde, yani sistem Kiriş-2'ye dik olarak uyarıldığında, maksimum uyarım bu kez Kiriş-2 üzerinde gerçekleşmekte ve bu durum Şekil 6.7(b)'de gösterilmektedir. Bu açı değişimi, sistemin yön bağımsız çalışma prensibini doğrulamakta; çünkü her iki kiriş de farklı yönlerde maksimum performans gösterebilmektedir. Bu da, sistemin çok yönlü hava akımı koşullarında enerji üretmeye devam edebileceğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca deneysel verilerden elde edilen güç eğrileri detaylı olarak incelendiğinde, hem

Kiriş-1 hem de Kiriş-2 için güç üretiminin maksimuma ulaştığı direnç değerinin yaklaşık olarak $R = 150k\Omega$ olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer, piezoelektrik elemanların elektriksel karakteristiği açısından optimum yük direncini temsil etmektedir ve maksimum güç transferinin gerçekleştiği durumu ifade eder. Bu gözlem, sistem tasarımında elektriksel yükün doğru seçiminin, toplam enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, farklı hava üfleme yönlerinde ve çeşitli yük dirençleri altında yapılan bu deneysel analizler, önerilen sistemin hem yön bağımsız çalışabildiğini hem de belirli bir direnç değeri etrafında maksimum enerji üretimi sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, sistemin gerçek çevresel koşullarda — özellikle rüzgar yönü ve şiddetinin sürekli değiştiği ortamlarda — kararlı ve verimli bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir. Bu da onu, düşük güçlü sensör ağları, çevresel izleme sistemleri ve kablosuz enerji gereksinimi olan diğer uygulamalar için uygun ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı haline getirmektedir.

6.2. Çok Yönlü Hava Akışı Uyarımı Deneysel Sonuçları

Bir önceki bölümde detaylı şekilde açıklandığı üzere, önerilen enerji hasadı sistemi, özel olarak konumlandırılmış iki kırıştan oluşmakta olup, bu yapı sayesinde hava akışının yönünden bağımsız olarak çalışabilme yeteneğine sahiptir. Sistem geometrisi ve düzenlemesi, herhangi bir yönelimde gelen hava akımından etkin bir şekilde enerji elde edilmesine olanak tanımakta ve hava akımının yönüne dair manuel bir ayarlamaya gerek duyulmaksızın kesintisiz çalışmayı mümkün kılmaktadır. Bu temel prensipten yola çıkarak, çok yönlü enerji hasadı sağlayan bir mekanizma tasarlanmış ve bu mekanizma Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

Söz konusu tasarımda, Savonius tipi bir rüzgar türbini bir rotora mekanik olarak bağlanmıştır. Rotorun karşı ucunda ise, kırışların serbest uçlarına yerleştirilmiş kalıcı mıknatıslarla etkileşime girecek şekilde konumlandırılmış silindirik bir kalıcı mıknatıs yer almaktadır. Rotor üzerindeki bu mıknatıs, özel olarak diyametik (çapa doğrultusunda) mıknatıslanmış olarak seçilmiştir; bu sayede, her iki kırış üzerindeki mıknatıslarla dengeli ve simetrik bir manyetik etkileşim oluşturulması sağlanmaktadır. Rüzgar türbininin dönmesiyle elde edilen dönel kinetik enerji, rotorun hareketine aktarılmakta ve bu hareket neticesinde rotor üzerindeki kalıcı mıknatıs, kırış uçlarında yer alan mıknatıslarla ardışık ve periyodik bir şekilde etkileşime geçmektedir. Bu etkileşim, kırışlar üzerine yönlü ve zamanla değişen manyetik kuvvetlerin uygulanmasına neden olmakta ve bu sayede her iki kırışte de titreşimler meydana

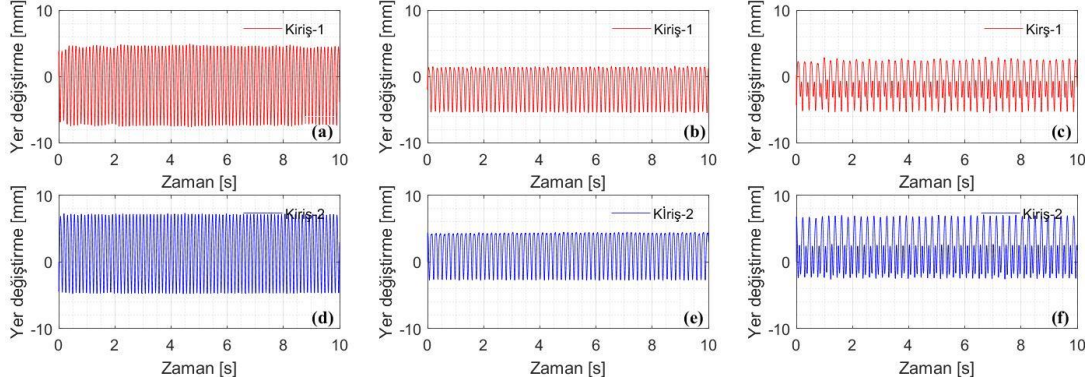
gelmektedir. Oluşan bu titreşimler, kirişlere yapıştırılmış piezoelektrik malzemeler tarafından mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır.

Bu yenilikçi tasarım, aerodinamik hareket ile manyetik eşleşmenin birlikte değerlendirilerek çok yönlü enerji hasadı gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, farklı yönlerden gelen rüzgâr koşullarında bile sistemin kararlı ve sürekli bir şekilde enerji üretmesi sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle yönü değişken olan doğal hava akımlarının söz konusu olduğu sahalarda sürdürülebilir enerji çözümleri sunmak açısından büyük potansiyel taşımaktadır. Önerilen kavramsal tasarımın uygulanabilirliğini deneysel olarak doğrulamak amacıyla, Şekil 4.6’da sunulan deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deneysel sistemde, bir doğru akım (DC) motoru, rüzgâr türbini rotorunun işlevini taklit edecek şekilde konumlandırılmış ve motorun dönme hızı, farklı rüzgâr koşullarını simüle edebilmek için hassas bir şekilde kontrol edilmiştir. Böylelikle, sistemin farklı çevresel koşullarda nasıl davrandığı kapsamlı biçimde incelenebilmiştir. Motorun dönüş hızı ayarlanarak, çeşitli dönme hızları altında deneysel veriler elde edilmiş ve bu sayede sistemin dinamik uyarım altındaki performansı çok yönlü olarak değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler kapsamında, rotorun sırasıyla 300, 400 ve 500 devir/dakika (rpm) hızlarında döndürülmesiyle kirişlerin verdiği yer değiştirme tepkileri kaydedilmiştir. Şekil 6.8’de sunulan bu yer değiştirme yanıtları, sistemin dönel hareketle indüklenen mekanik uyarımlara karşı ne ölçüde duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, sistemin değişken hızlarda bile etkin şekilde titreşim üretebildiğini ve bu titreşimlerin kirişler üzerinde belirgin mekanik deformasyonlara neden olduğunu açıkça göstermektedir.

Ayrıca, aynı dönme hızı koşullarında, yani 300, 400 ve 500 rpm hızlarında elde edilen elektriksel çıktı değerleri de değerlendirilmiştir. Şekil 6.9’da gösterildiği üzere, piezoelektrik malzemeler aracılığıyla kirişlerden elde edilen elektrik enerjisi, dönel hızın artmasıyla birlikte belirgin bir şekilde yükselmektedir. Bu durum, rotor hızındaki artışın titreşim genliklerini artırarak piezoelektrik çıkış voltajında ve dolayısıyla enerji üretiminde doğrudan bir yükselişe neden olduğunu kanıtlamaktadır. Elde edilen deneysel bulgular, önerilen sistemin farklı mekanik uyarım düzeyleri altında çalışabilirliğini ve enerji üretme potansiyelini doğrulamaktadır. Bu bağlamda, sistemin sadece sabit rüzgâr koşullarında değil, aynı zamanda değişken hızlardaki çevresel etkiler altında da kararlı ve etkili bir biçimde çalışabildiği

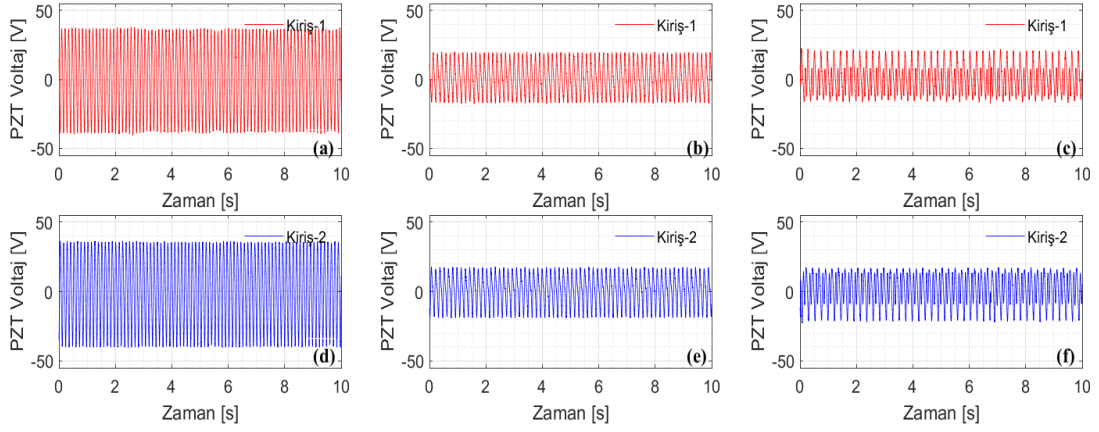
kanıtlanmış olmaktadır. Sonuç olarak, bu deneysel doğrulama, yön bağımsız ve değişken hızlı rüzgar kaynakları altında çalışabilecek enerji hasadı sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir adımı temsil etmektedir.



Şekil 6.8. Farklı rotor devir hızlarında kirislerin yer değiştirme davranışı. (a) Beam-1: $\omega = 500$ rpm (b) Beam-1: $\omega = 400$ rpm (c) Beam-1: $\omega = 300$ rpm (d) Beam-2: $\omega = 500$ rpm (e) Beam-2: $\omega = 400$ rpm (f) Beam-2: $\omega = 300$ rpm.

Test edilen koşullar arasında, en yüksek enerji hasadı performansı 500 devir/dakika (rpm) rotor hızında gözlemlenmiştir. Ancak bu sonuç, sistemin tüm uygulama senaryoları için geçerli en uygun hız olduğu anlamına gelmemektedir. Gerçek dünya uygulamalarında, optimum rotor hızı; kullanılan rüzgar türbininin gerçek dönme hızı ile sistemde yer alan kirislerin doğal frekansına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, enerji üretimini maksimize edebilmek için, sistemin çalışma koşullarına uygun şekilde ayarlanması büyük önem taşır.

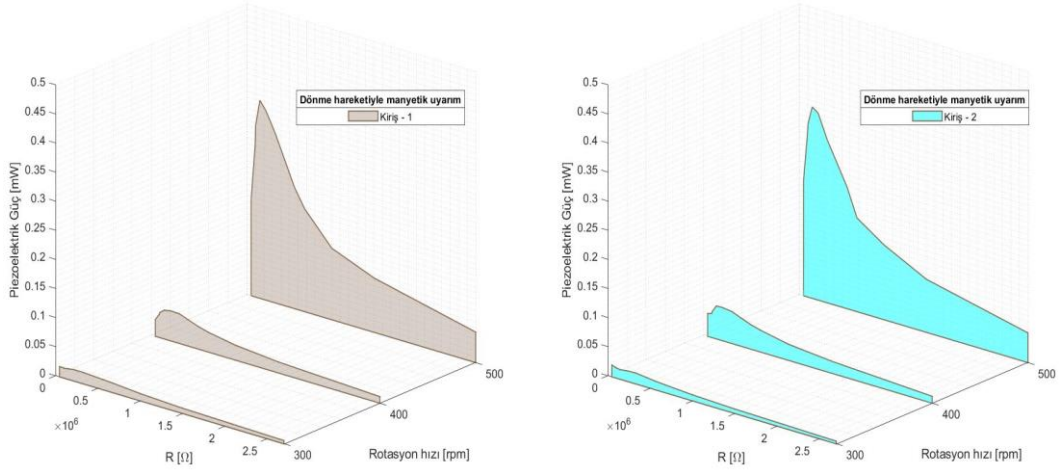
Başka bir ifadeyle, uyarım frekansının yapının rezonans özellikleriyle olabildiğince uyumlu hale getirilmesi gerekir. Bu tür frekans uyumu sağlandığında, kirislerin titreşim genlikleri artar ve buna bağlı olarak piezoelektrik elemanlardan elde edilen elektrik enerjisi de maksimum seviyeye ulaşır. Dolayısıyla, sistemin kurulumundan önce ya da kullanım sürecinde yapılacak frekans uyumlaması işlemleri, gerçekçi işletme koşulları altında enerji verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır.



Şekil 6.9. Rotor tabanlı manyetik uyarım durumunda piezoelektrik elemanlardan elde edilen gerilim çıkışları: (a) Beam-1: $\omega = 500$ rpm (b) Beam-1: $\omega = 400$ rpm (c) Beam-1: $\omega = 300$ rpm (d) Beam-2: $\omega = 500$ rpm (e) Beam-2: $\omega = 400$ rpm (f) Beam-2: $\omega = 300$ rpm.

Manyetik uyarımlı sistemin performansı, güç çıkışı özellikleri açısından da kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Şekil 6.10, farklı dönme hızlarına bağlı olarak elektriksel gücün yük direncine göre değişimini göstermektedir. Önceki bölümde tartışılan güç eğrilerine benzer şekilde, elde edilen sonuçlarda tüm test edilen hızlarda güç çıkışının $R = 150k\Omega$ direnç değerinde bir tepe noktasına ulaştığı gözlemlenmiştir.

Bu tutarlı tepe noktası davranışı, sistemin değişken dönme uyarımları altında nispeten stabil ve kararlı bir optimum yük koşuluna sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, mekanik titreşimlerden elektriksel çıktıya verimli enerji aktarımı sağlanabilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Başka bir deyişle, yük direncinin doğru seçilmesi, sistemin maksimum enerji hasadı performansını elde etmesini mümkün kılmakta ve böylece pratik uygulamalarda enerji dönüşüm verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu analiz, sistem tasarımında ve uygulamasında yük direncinin optimize edilmesinin gerekliliğini ve önemini vurgulamakta olup, enerji hasadı cihazlarının gerçek çalışma koşullarına uyarlanmasında yol gösterici olmaktadır.

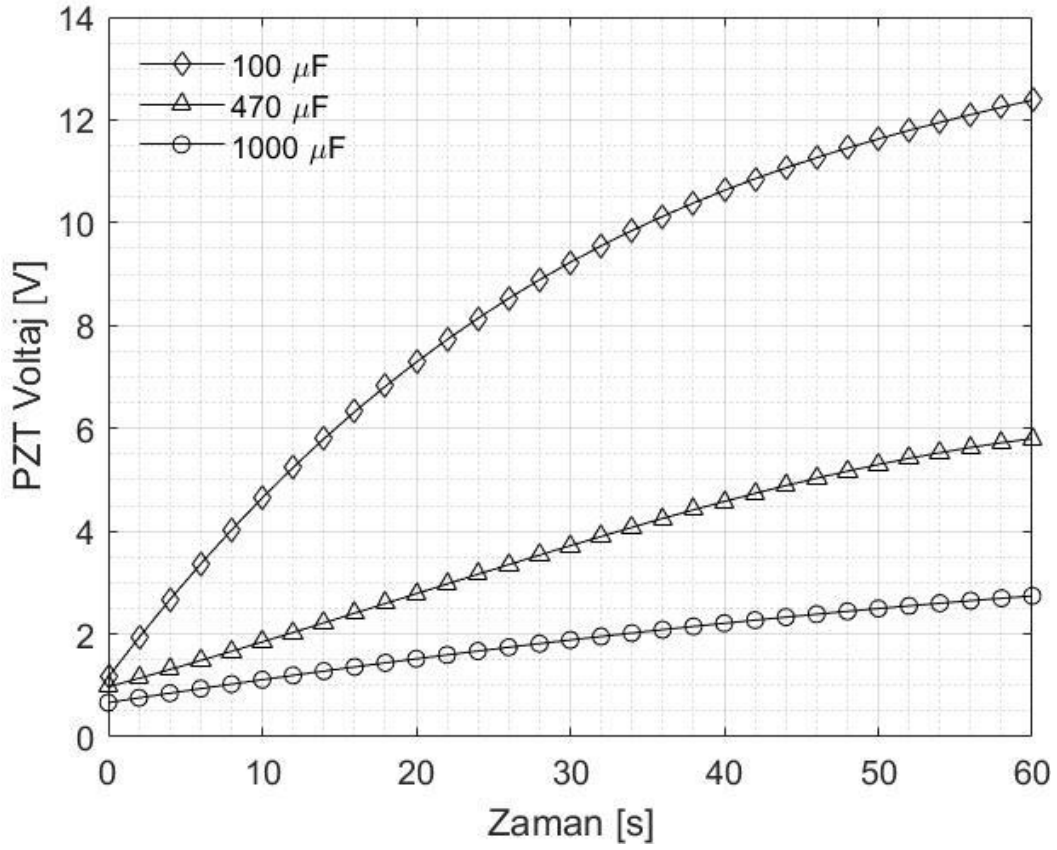


Şekil 6.10. Farklı elektrik yükleri altında dönme hızının piezoelektrik enerji hasadı gücüne etkisi.

6.3. Önerilen Çalışmanın Uygulaması

DeneySEL sonuçların son kısmı, önerilen enerji hasadı sisteminin pratik uygulanabilirliğini ortaya koymaya odaklanmaktadır. Enerji hasadı, küçük ölçekli kablosuz sensörler ve düşük güçlü elektronik cihazların enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik aktif bir araştırma alanı olarak yaygın şekilde kabul görmektedir. Bu cihazların çoğu doğru akım (DC) ile çalıştığından, elde edilen enerjinin kullanılmadan önce uygun şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu uyumluluğu sağlamak amacıyla, sistemden elde edilen alternatif akım (AC) çıkışı, tam köprü doğrultucu devresi kullanılarak doğrultulmalı ve ardından bir kapasitör veya süperkapasitör gibi enerji depolama elemanında depolanmalıdır. Şekil 6.11’de, sistem tarafından sağlanan enerji çıktısı altında, farklı kapasitans değerlerine sahip kapasitörlerin zamana bağlı şarj performansı gösterilmektedir.

Bu sonuçlar, sistemin gerçek dünya uygulamalarında düşük güçlü elektronik cihazları beslemek için uygun formda kullanılabilir enerji sağlayabildiğine dair net bir gösterge sunmaktadır. 5V referans voltajı baz alınarak yapılan analizde, 100 μ F kapasitör yaklaşık 10 saniye içinde tam doluluğa ulaşmaktadır. Bu bulgu, sistemin nispeten kısa bir süre içerisinde kullanılabilir düzeyde elektrik enerjisi üretebildiğini ortaya koymakta ve pratik uygulamalarda düşük enerjili elektronik bileşenlerin beslenmesi için uygunluğunu daha da desteklemektedir.



Şekil 6.11. Farklı kapasitör tiplerinin şarj hızları.

Önerilen enerji hasadı sisteminin pratik uygulanabilirliğini daha kapsamlı bir şekilde ortaya koymak amacıyla, kavramsal bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, sistemin enerji çıktısı kullanılarak bir dizi ışık yayan diyot (LED) ile iç ve dış ortam sıcaklıklarını ölçen bir sensör beslenmiştir. Sistem akışının genel işleyişi ve bileşenler arasındaki etkileşimler, Şekil 6.12’de şematik olarak detaylandırılmıştır.

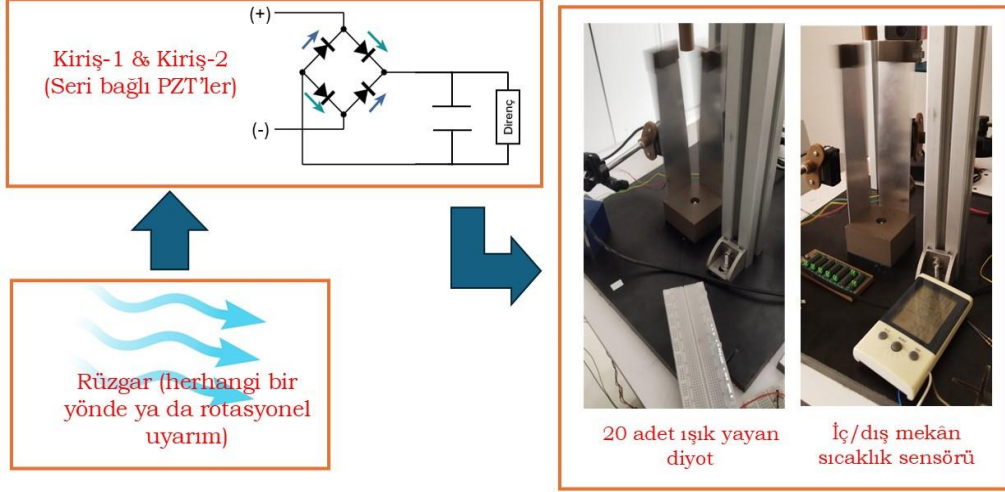
Bahsi geçen konfigürasyonda, herhangi bir yönden gelen hava akımı her iki kiriş üzerinde eş zamanlı titreşimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu sayede, enerji hasadı yön bağımsız bir biçimde gerçekleşmekte ve sistem sürekli bir enerji üretimi sağlayabilmektedir. Kirişlere entegre edilen piezoelektrik elemanlar seri bağlanarak tam köprü doğrultucu devresi ile elektriksel ara yüz oluşturulmuştur. Doğrultulanmış olan alternatif akım (AC) enerjisi, bir kapasitörde geçici olarak depolanmakta ve daha sonra bağlı elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılmaktadır.

DeneySEL sonuçlar ve Şekil 6.12’de yer alan görsel veriler doğrultusunda, sistemin

ürettiği enerji 20 adet LED'in aydınlatılması ve sıvı kristal ekran tabanlı sıcaklık sensörünün başarılı bir şekilde çalıştırılması için yeterli bulunmuştur. Bu durum, geliştirilen sistemin düşük güç gereksinimi olan elektronik uygulamalarda kullanılabilir enerji sağlama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, söz konusu uygulama, önerilen enerji hasadı sisteminin kompakt ve otonom enerji çözümleri gerektiren gerçek dünya senaryolarına entegrasyonunun mümkün ve etkili olduğunu kanıtlamaktadır.

Bunun yanı sıra, sistem tasarımının modüler ve ölçeklenebilir yapısı, farklı büyüklükte enerji hasadı dizilerine ya da hibrit enerji sistemlerine entegrasyon açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu özellik, özellikle geleneksel enerji kaynaklarının erişiminin sınırlı olduğu veya bakım gereksinimlerinin yüksek olduğu uzak veya zor erişilen bölgelerde, sürdürülebilir ve güvenilir enerji çözümleri sağlama potansiyelini artırmaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, sistem verimliliğini artırmak amacıyla elektriksel ara devrelerin optimizasyonu, enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve ileri düzey güç elektroniği uygulamalarının araştırılması önemli bir odak noktası olabilir. Ayrıca, sistemin farklı kablosuz ve otonom sensör ağları ile entegrasyonu ve uygulama alanlarının genişletilmesi de araştırma gündeminde yer almalıdır. Bu yönelimler, önerilen enerji hasadı sisteminin performansını artırarak, geniş kapsamlı ve çeşitli çevresel koşullarda güvenilir enerji temini sağlamasını mümkün kılacaktır.



Şekil 6.12. Önerilen enerji hasadı sistemi için farklı uygulama örnekleri.

Bu bulgular, önerilen sistemin kablosuz sensör ağları, Nesnelerin İnterneti (IoT) platformları ve otonom, bakım gerektirmeyen enerji tedarikinin kritik olduğu diğer dağıtık elektronik sistemlere entegrasyon potansiyelini vurgulamaktadır. Ortamdaki mekanik uyarımlar altında depolama bileşenlerinin sürekli şarj edilmesini mümkün kılan bu sistem, uzak veya zor erişilen bölgelerde düşük güç tüketimli cihazların çalışma ömrünü uzatmaya yönelik uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

7.SONUÇ

Bu tez çalışmasında, rüzgâr veya hava akımının yönünden bağımsız olarak enerji hasadı yapabilen, manyetik uç kütleli çift ankastre kirişli piezoelektrik enerji hasadı sisteminin tasarımı, analizi ve deneysel doğrulaması kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Geleneksel enerji hasadı sistemlerinin çoğunlukla belirli bir yönden gelen mekanik uyarılara bağımlı olması, bu sistemlerin rüzgârın yön değiştirmesi durumunda verimlilik kaybı yaşaması gibi önemli bir sınırlamaya sahiptir. Buna karşılık, bu çalışmada önerilen sistem, manyetik uç kütlelerin kirişlere dik açılarla konumlandırılması sayesinde yön bağımsız olarak titreşim üretebilmekte ve dolayısıyla rüzgâr yönünden bağımsız olarak kesintisiz enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Bu özellik, özellikle rüzgâr yönünün sıkça değiştiği doğal ve dış mekân uygulamalarında önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Manyetik uç kütlelerin konumu ve manyetik polarizasyon yönlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan detaylı analizleri, manyetik kuvvetlerin kirişler arasındaki karmaşık etkileşimlerini ve bu etkileşimlerin titreşim dinamiklerine olan etkilerini ortaya koymuştur. Böylece, sistemin mekanik ve manyetik bileşenlerinin optimize edilmesi için temel bir altyapı oluşturulmuş, teorik model ile deneysel bulgular arasında tutarlılık sağlanmıştır. Özellikle, döner manyetik alanların her iki kirişi eş zamanlı ve periyodik olarak titreştirdiği, bu sayede enerji hasadının sürekli ve etkin biçimde sürdürülebileceği deneysel olarak da doğrulanmıştır.

Deneysel çalışmalar, sistemin farklı hava akımı açıları ve rotor hızlarındaki performansını ayrıntılı olarak incelemiş, bu süreçte piezoelektrik voltaj çıkışı, yer değiştirme değerleri ve elektriksel güç çıktısı gibi önemli parametreler değerlendirilmiştir. Rotor hızının artırılması ile birlikte hem mekanik titreşim genliklerinde hem de elektriksel enerji üretiminde anlamlı artışlar kaydedilmiş, bu da sistemin değişken çevresel ve mekanik uyarılara karşı adaptif ve esnek bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Böylelikle, gerçek dünya koşullarında rüzgâr hız ve yön değişikliklerine uyum sağlayarak enerji verimliliğini maksimize eden bir enerji hasadı mekanizması ortaya konmuştur.

Ayrıca, sistemin pratik uygulama potansiyelini göstermek amacıyla, piezoelektrik elemanlardan elde edilen AC elektrik enerjisinin doğrultulması ve depolanması süreçleri başarıyla gerçekleştirilmiş; farklı kapasitörlerin şarj hızları analiz edilerek sistemin düşük güçlü elektronik cihazlar için yeterli ve güvenilir bir enerji kaynağı olduğu ortaya konmuştur. Bu

kapsamda, LED aydınlatmalar ve LCD tabanlı sıcaklık sensörü gibi elektronik bileşenlerin enerji hasadı sistemi tarafından kesintisiz şekilde çalıştırılması, sistemin saha uygulamalarına yönelik uygunluğunu ve güvenilirliğini kanıtlamıştır.

Bununla birlikte, sistemin modüler yapısı ve ölçeklenebilirliği, farklı büyüklüklerde ve kapasitede enerji hasadı platformlarının geliştirilmesine imkân tanımakta, bu sayede geniş alanlarda ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmaktadır. Özellikle, kablosuz sensör ağları, Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları, çevresel izleme sistemleri ve diğer otonom elektronik platformlarda bakım gerektirmeyen, sürekli enerji sağlayan bir güç kaynağı olarak önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu özellikleri sayesinde, uzak ve erişilmesi zor bölgelerde enerji temini için sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler sunmaktadır.

Gelecek araştırmalar için önerilen çalışmalar arasında, elektriksel ara yüz devrelerinin optimizasyonu, enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve sistem verimliliğinin artırılması yer almaktadır. Ayrıca, hibrit enerji sistemleri ile entegrasyon yoluyla daha yüksek güç çıkışları elde edilmesi ve farklı yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte çalışabilirlik sağlanması sistemin uygulama alanlarını genişletecektir. Malzeme bilimi ve piezoelektrik elemanların geliştirilmesi ile daha yüksek verimli enerji dönüşümü gerçekleştirilerek sistem performansı artırılabilir.

Sonuç olarak, bu tezde geliştirilen manyetik uç kütleli piezoelektrik enerji hasadı sistemi, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve düşük güç tüketimli cihazların enerji ihtiyacının karşılanması açısından yenilikçi ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Hem teorik hem de deneysel boyutlarda kapsamlı biçimde doğrulanan bu sistem, enerji hasadı teknolojileri alanında önemli bir ilerleme sağlamakta, geleceğin akıllı şehirleri, çevresel izleme sistemleri ve diğer otomatik enerji ihtiyaçlarında kritik bir rol oynayabilecek potansiyele sahiptir.

KAYNAKÇA

- Al-Ashtari, W., Hunstig, M., Hemsell, T., & Sextro, W.** (2012). Frequency tuning of piezoelectric energy harvesters by magnetic force. *Smart Materials and Structures*, 21(3), 035019.
- Amini, Y., Heshmati, M., Fatehi, P., & Habibi, S. E.** (2017). Piezoelectric energy harvesting from vibrations of a beam subjected to multi-moving loads. *Applied Mathematical Modelling*, 49, 1-16.
- Anton, S. R., & Sodano, H. A.** (2007). A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart materials and Structures*, 16(3), R1.
- Brunelli, D., Moser, C., Thiele, L., & Benini, L.** (2009). Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 56(11), 2519-2528.
- Cao, J., Zhou, S., Inman, D. J., & Chen, Y.** (2015). Chaos in the fractionally damped broadband piezoelectric energy generator. *Nonlinear Dynamics*, 80(4), 1705-1719.
- Çavuş, B., & Oy, S. A.** (2024). Zemin Entegre Piezoelektrik Sensörden Enerji Hasadı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 201-210.
- Collins, I., Hossain, M., Dettmer, W., & Masters, I.** (2021). Flexible membrane structures for wave energy harvesting: A review of the developments, materials and computational modelling approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111478.
- Cottone, F., Vocca, H., & Gammaitoni, L.** (2009). Nonlinear energy harvesting. *Physical review letters*, 102(8), 080601.
- Curie, J., & Curie, P.** (1880). Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Bulletin de minéralogie*, 3(4), 90-93.
- Deepak, P., & George, B.** (2020). Piezoelectric energy harvesting from a magnetically coupled vibrational source. *IEEE Sensors Journal*, 21(3), 3831-3838.
- Erturk, A., & Inman, D. J.** (2011). Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration*, 330(10), 2339-2353.
- Fan, K., Liu, S., Liu, H., Zhu, Y., Wang, W., & Zhang, D.** (2018). Scavenging energy from ultra-low frequency mechanical excitations through a bi-directional hybrid energy harvester. *Applied Energy*, 216, 8-20.
- Fang, F., Xia, G., & Wang, J.** (2018). Nonlinear dynamic analysis of cantilevered piezoelectric energy harvesters under simultaneous parametric and external excitations. *Acta Mechanica Sinica*, 34(3), 561-577.
- Khan, T. A., Alkhateeb, A., & Heath, R. W.** (2016). Millimeter wave energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(9), 6048-6062.
- Li, Z., Peng, X., Hu, G., & Peng, Y.** (2022). Theoretical, numerical, and experimental studies of a frequency up-conversion piezoelectric energy harvester. *International Journal of Mechanical Sciences*, 223, 107299.
- Meeker, D.** (2010). Finite element method magnetics. *FEMM*, 4(32), 162.
- Mohanty, A., Parida, S., Behera, R. K., & Roy, T.** (2019). Vibration energy harvesting: A review. *Journal of Advanced Dielectrics*, 9(04), 1930001.
- Raghunathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J., & Srivastava, M.** (2005, April). Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. In *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005.* (pp. 457-462). IEEE.
- Saadon, S., & Sidek, O.** (2011). A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters. *Energy conversion and management*, 52(1), 500-504.

- Safari, A., & Akdogan, E. K. (Eds.).** (2008). *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*. Springer Science & Business Media.
- Searle, T., Yildirim, T., Ghayesh, M. H., Li, W., & Alici, G.** (2017). Design, fabrication, and test of a coupled parametric–transverse nonlinearly broadband energy harvester. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(2), 457-464.
- Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Van Heyst, B.** (2015). A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 106, 728-747.
- Stanton, S. C., McGehee, C. C., & 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.
- Tran, N., Ghayesh, M. H., & Arjomandi, M.** (2018). Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement. *International Journal of Engineering Science*, 127, 162-185.
- Uchino, K.** (1996). *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- Wang, K., Hu, F., Mao, M., Liu, Y., & Wang, H.** (2016, October). Design of a multi-directional piezoelectric energy harvester with spring and magnetic coupling. In *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)* (pp. 126-129). IEEE.
- Wen, Q., He, X., Lu, Z., Streiter, R., & Otto, T.** (2021). A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters. *Nano Materials Science*, 3(2), 170-185.
- Wen, S., Wu, Z., & Xu, Q.** (2019). Design of a novel two-directional piezoelectric energy harvester with permanent magnets and multistage force amplifier. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 67(4), 840-849.
- Wu, N., Bao, B., & Wang, Q.** (2021). Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output. *Engineering Structures*, 235, 112068.
- Zheng, X., He, L., Wang, S., Liu, X., Liu, R., & Cheng, G.** (2023). A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 352, 114190.
- Zhou, S., Cao, J., Erturk, A., & Lin, J.** (2013). Enhanced broadband piezoelectric energy harvesting using rotatable magnets. *Applied physics letters*, 102(17).
- Zhou, S., Cao, J., Inman, D. J., Lin, J., Liu, S., & Wang, Z.** (2014). Broadband tristable energy harvester: modeling and experiment verification. *Applied Energy*, 133, 33-39.
- Zhou, S., Cao, J., Wang, W., Liu, S., & Lin, J.** (2015). Modeling and experimental verification of doubly nonlinear magnet-coupled piezoelectric energy harvesting from ambient vibration. *Smart Materials and Structures*, 24(5), 055008.
- Zhu, Y., & Zu, J. W.** (2013). Enhanced buckled-beam piezoelectric energy harvesting using midpoint magnetic force. *Applied Physics Letters*, 103(4), 041901.
- Zuo, J., Dong, L., Yang, F., Guo, Z., Wang, T., & Zuo, L.** (2023). Energy harvesting solutions for railway transportation: A comprehensive review. *Renewable Energy*, 202, 56-87.