

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



**KÖPRÜ YAPILARDA PIEZOELEKTRİK ENERJİ
ÜRETEÇLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİMİ**

Buğra ŞEN

Yüksek Lisans Tezi

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı

HAZİRAN 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

KÖPRÜ YAPILARDA PIEZOELEKTRİK ENERJİ ÜRETEÇLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİMİ

Tez Yazarı
Buğra ŞEN

Danışman
Prof. Dr. Hikmet ESEN

İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Alper POLAT

HAZİRAN 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Köprü Yapılarda Piezoelektrik Enerji Üreteçlerinin Optimal Yerleşimi
Yazarı: Buğra ŞEN
İlk Teslim Tarihi: 17.05.2022
Savunma Tarihi: 17.06.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hikmet ESEN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Resul ÇÖTELİ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah KAPICIOĞLU Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Köprü Yapılarda Piezoelektrik Enerji Üreteçlerinin Optimal Yerleşimi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

17.06.2022

Buğra ŞEN



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmamda yol göstericiliğiyle ufkumu açan, olumlu tavırlarıyla beni cesaretlendiren, bilgi birikimiyle çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan beraber çalışmaktan gurur duyduğum danışman hocalarım Prof. Dr. Hikmet ESEN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Alper POLAT'a sonsuz teşekkür ederim.

Buğra ŞEN
ELAZIĞ, 2022



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. PIEZOELEKTRİK.....	3
2.1. Piezoelektrik Tarihi	5
2.2. Elektrik Polarizasyon.....	6
2.3. Piezoelektrik Malzemeler	7
2.3.1. Piezoelektrik Tek Kristaller.....	8
2.3.2. Piezo Seramikler	9
2.3.3. İnce Filmler Piezoelektrik Malzemeler	11
2.3.4. Piezo Polimerler	12
2.3.5. Piezo Kompozitler.....	12
2.4. Piezoelektrik Malzeme Parametreleri.....	13
2.4.1. Elektromekanik Davranış.....	13
2.4.2. Piezoelektrik Temel Denklemler.....	18
2.4.3. Simetri ve Piezoelektriklik	19
2.4.4. Piezoelektrik Seramiklerin Çalışma Modları	19
2.4.5. Piezoelektrik Sabitler	21
2.4.6. Dinamik Malzeme Parametreleri.....	22
3. ENERJİ KAZANIMI.....	24
3.1. Güneş Enerjisi Tabanlı Elektrik Enerjisi Kazanımı	25
3.2. Termal Enerji Tabanlı Elektrik Enerjisi Kazanımı	25
3.3. Radyo Frekans Enerjisinden Elektrik Enerjisi Kazanımı	26
3.4. Titreşimden Enerji Kazanımı	26
3.4.1. Elektromanyetik Enerji Üreteçleri.....	28
3.4.2. Piezoelektrik Enerji Üreteçleri (PEÜ).....	28
3.4.3. ElektroStatik Enerji Üreteçleri	29
3.4.4. Manyetostriktif Enerji Üreteçleri	29
4. METARYAL VE METOT	31
4.1. Modal Analiz	32
4.2. Harmonik Analiz	34
4.3. Piezoelektrik Analiz	37
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
6. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Köprü Yapılarda Piezoelektrik Enerji Üreteçlerinin Optimal Yerleşimi

Buğra ŞEN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2022, Sayfa: xi + 62

Bu çalışmada köprü yapılarıdaki araç geçişlerinden dolayı köprülerde oluşan titreşimlerden Piezoelektrik Enerji Üreteçleri (PEÜ) aracılığıyla enerji kazanımı amaçlanmıştır. Kazanılan enerjinin de maksimum düzeyde olabilmesi için PEÜ'lerin optimal konumlara yerleşimi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada üç farklı araç yükü ve üç farklı piezoelektrik malzeme kullanılarak köprü yapılarıdaki titreşimlerden enerji kazanımı elde edilmiştir. Elazığ'ın Baskil ilçesi Kuşsarayı köyünde bulunan Kuşsarayı-2 köprüsünün projesi gerçek ölçülerle ANSYS programında modellenmiştir. Köprü'nün sırasıyla modal, harmonik ve piezoelektrik enerji kazanımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Toplam 9 adet PEÜ için üç farklı piezoelektrik malzeme (PZT-4, PZT-5A ve PZT-8) kullanılarak en fazla enerji üretiminin olduğu tip belirlenmiş ve sonuçların karşılaştırılabilmesi için üç farklı araç yükü (60 kN, 90 kN ve 120 kN) altında toplamda 13 farklı çözüm yapılmıştır. Analizler gerçekleştirildiğinde elde edilen maksimum toplam gücün 120 kN yük altındaki PZT-5A malzemeli PEÜ ile 1.484 μ W olduğu hesaplanmıştır. Sağlanan bu güç, köprülerin yapısal sağlığını izlemeye kullanılan kablosuz sensör sistemlerine yeterli gelecek seviyededir. Titreşim ile enerji kazanımının güneş ve rüzgâr gibi enerji kaynaklarının aksine meteorolojik öğelerden bağımsız olduğu düşünüldüğünde bu sistemlerin yaygınlaştırılması ile mevcut sistemlerde oluşan atık pillerin de çevreye zararı önlenmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik, Enerji kazanım, Enerji üretici, ANSYS, Köprü yapı.

ABSTRACT

Optimal Placement of Piezoelectric Energy Harvesters in Bridge Structures

Buğra ŞEN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering

June 2022, Pages: xi + 62

In this study, it is aimed to harvesting energy from vibrations in bridges due to vehicle movements in bridge structures by using Piezoelectric Energy Harvester (PEH). In order to maximize the energy harvesting, it is aimed to place the PEH's in their optimal positions. In the study, energy harvesting was obtained from vibrations in bridge structures by using three different vehicle loads and three different piezoelectric materials. The project of Kuşsarayı-2 bridge, located in Kuşsarayı village of Baskil district of Elazığ, was modeled with real dimensions in the ANSYS program. The modal, harmonic and piezoelectric energy harvesting analysis of the bridge were carried out, respectively. For a total of 9 PEH's, three different piezoelectric materials (PZT-4, PZT-5A ve PZT-8) were used to determine the type with the highest energy harvest, and in order to compare the results, a total of 13 different solutions were made under three different vehicle loads (60 kN, 90 kN ve 120 kN). When the analyzes were performed, it was calculated that the maximum total power obtained was 1.484 μ W with the PZT-5A material PEH under 120 kN load. This power is sufficient for wireless sensor systems used to monitor the structural health of bridges. Considering that energy harvesting by vibration is independent of meteorological elements, unlike energy sources such as the sun and wind, the widespread use of these systems will prevent the environmental damage of waste batteries formed in existing systems.

Keywords: Piezoelectric, Energy harvesting, Energy harvester, ANSYS, Bridge structure.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	(a) Piezoelektrik polarizasyonu bozulmamış bir molekül (b) Molekülün bir dış kuvvete maruz kalması (c) Piezoelektrik malzeme bir dış kuvvete maruz kaldığında yüzeydeki polarizasyon etkisi.....	3
Şekil 2.2.	Kısa devre akım akışı a) Dış kuvvete kaldığında b) Normal durumda.	4
Şekil 2.3.	Piezoelektriklik	5
Şekil 2.4.	Çeşitli polarizasyon mekanizmalarının frekans bağımlılığı.....	7
Şekil 2.5.	Atomların ve iyonların polarizasyonuna göre katıların sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.6.	Kuvars.....	9
Şekil 2.7.	PZT	11
Şekil 2.8.	Baryum titanat.	11
Şekil 2.9.	PVDF görünümü.....	12
Şekil 2.10.	Bir iletken plakanın elektriksel davranışı a) Boş alanda b) Dielektrik ortamda.	13
Şekil 2.11.	Elastik Davranış.....	16
Şekil 2.12.	Dikdörtgen şekilli bir bileşendeki direkt piezoelektrik etki	17
Şekil 2.13.	Dikdörtgen şekilli bir bileşendeki direkt piezoelektrik etki	17
Şekil 2.14.	Eksenlerin ve deformasyon yönlerinin belirlenmesi	18
Şekil 2.15.	Piezoelektrik seramik bileşeni için çalışma modları	20
Şekil 3.1.	Enerji kazanım ilkeleri.....	27
Şekil 4.1.	Kuşarayı-2 Köprüsü'nün ANSYS programında modellenmiş görüntüsü.	31
Şekil 4.2.	Köprünün sonlu elemanlarına ayrılmış görüntüsü.	32
Şekil 4.3.	Köprünün sonlu elemanlarına ayrılmış görüntüsü.	32
Şekil 4.4.	Piezoelektrik enerji üretici (PEÜ).	38
Şekil 5.1.	Köprünün modal analiz ile 3.7986 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 1).	40
Şekil 5.2.	Köprünün modal analiz ile 4.0264 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 2).	41
Şekil 5.3.	Köprünün modal analiz ile 5.0909 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 3).	41
Şekil 5.4.	Köprünün modal analiz ile 5.3150 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 4).	42
Şekil 5.5.	Köprünün modal analiz ile 8.3372 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 5).	42

Şekil 5.6.	Köprünün modal analiz ile 9.7046 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 6).	43
Şekil 5.7.	60 kN yük altındaki harmonik analiz görünümü.....	43
Şekil 5.8.	90 kN yük altındaki harmonik analiz görünümü.....	44
Şekil 5.9.	120 kN yük altındaki harmonik analiz görünümü.....	44
Şekil 5.10.	PEÜ'lerin konumu.	45
Şekil 5.11.	PEÜ'lerin konumu.	45
Şekil 5.12.	120 kN yük altında PEÜ-1'in farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.	46
Şekil 5.13.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-1'in gerilim frekans değişimi.....	46
Şekil 5.14.	120 kN yük altında PEÜ-2'nin farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.	47
Şekil 5.15.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-2'nin gerilim frekans değişimi.....	47
Şekil 5.16.	120 kN yük altında PEÜ-3'ün farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.....	48
Şekil 5.17.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-3'ün gerilim frekans değişimi.....	48
Şekil 5.18.	120 kN yük altında PEÜ-4'ün farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.....	49
Şekil 5.19.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-4'ün gerilim frekans değişimi.....	49
Şekil 5.20.	120 kN yük altında PEÜ-5'in farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.	50
Şekil 5.21.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-5'in gerilim frekans değişimi.....	50
Şekil 5.22.	120 kN yük altında PEÜ-6'nın farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.	51
Şekil 5.23.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-6'nın gerilim frekans değişimi.....	51
Şekil 5.24.	120 kN yük altında PEÜ-7'nin farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.	52
Şekil 5.25.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-7'nin gerilim frekans değişimi.....	52
Şekil 5.26.	120 kN yük altında PEÜ-8'in farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.	53
Şekil 5.27.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-8'in gerilim frekans değişimi.....	53
Şekil 5.28.	120 kN yük altında PEÜ-9'un farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.....	54
Şekil 5.29.	Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-9'un gerilim frekans değişimi.....	54
Şekil 5.30.	PZT-4 malzemeli PEÜ'lerin 120 kN yük altındaki gerilim frekans değişimi.....	55
Şekil 5.31.	PZT-5A malzemeli PEÜ'lerin 120 kN yük altındaki gerilim frekans değişimi.	56
Şekil 5.32.	PZT-8 malzemeli PEÜ'lerin 120 kN yük altındaki gerilim frekans değişimi.....	56
Şekil 5.33.	120 kN yük altındaki PZT-5A Malzemeli PEÜ'lerden elde edilen maksimum güçlerin görünümleri.....	58
Şekil 5.34.	PEÜ'lerden kazanılan maksimum toplam güç görünümleri.	58

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Beton özellikleri.....	31
Tablo 4.2. Piezoelektrik enerji üreticilerinin özellikleri.....	38
Tablo 4.3. Piezoelektrik malzemelerin özellikleri.....	39
Tablo 5.1. PEÜ'lerin ürettikleri maksimum gerilim değerleri.....	57
Tablo 5.2. PEÜ'lerin ürettikleri maksimum güç değerleri.....	57



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

AlN	: Alüminyum Nitrit
BaTiO ₃	: Baryum Titanat
KNbO ₃	: Potasyum Niyobat
LiTaO ₃	: Lityum Titanat
PbTiO ₃	: Kurşun Titanat
PZT	: Kurşun Zirkonat Titanat
SiO ₂	: Kuvars
ZnO	: Çinko Oksit

Kısaltmalar

MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
PEÜ	: Piezoelektrik Enerji Üretici
PVDF	: Poliviniliden Florür

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı ve enerji üretim çalışmaları geçmişten günümüze kadar her zaman popüler konular olmuştur. Son yıllarda nüfus, teknolojik gelişim ve sanayinin artışına paralel olarak yükselen enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla alternatif enerji kaynakları önem kazanmaya başlamıştır. Mühendislik geçmişten günümüze kadar olan süreçte sürekli gelişim göstermiş ve ihtiyaç alanlarının genişlemesi ile birlikte yenilikler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan yeniliklerin içerisinde piezoelektrik malzeme kullanımı ile titreşim bazlı piezoelektrik enerji kazanımı son yıllarda araştırmacıların dikkati çekmiştir. Ayrıca dünyadaki artan ulaşım ihtiyacı ile birlikte köprü sayısında önemli bir artış olmuştur. Ancak köprüler deprem, korozyon, rüzgâr ve kar yağışı gibi çeşitli bozucu etkenlere maruz kalmaktadır. Bu yüzden köprü güvenliğinin sağlanabilmesi, yapısal sorunların acil olarak tespit edilebilmesi ve bu sorunların izlenebilmesi için kablosuz sensör sistemleri kullanılmaktadır [1–3]. Kablosuz sensör sistemleri kablolu sensör sistemlerine göre esneklik, uygulama kolaylığı, kablolama maliyeti ve daha önce erişilemeyen konumlara yerleştirme potansiyeli olduğundan dolayı daha fazla ilgi görmektedir [4]. Köprü yapılarıdaki kablosuz sensörlerin enerji ihtiyacının pil ile karşılanması durumunda bu pillerin sonlu bir enerji kaynağı olması nedeniyle belirli aralıklarla pillerin değiştirilmesi gerekir, fakat bu işlem hem çok zor ve tehlikeli hem de maliyetlidir [5]. Köprü yapılarıdaki kablosuz sensörlerin daimi olarak çalışabilmesi için yenilenebilir enerji kaynağı gerekmektedir. Köprü yapılarının ortamı düşünüldüğünde güneş, rüzgâr ve titreşim bazlı enerji kaynakları kullanılabilir. Titreşim bazlı enerji kaynakları rüzgâr ve güneş enerjisinin aksine hava şartlarından bağımsızdır. Köprü yapılarıdaki araç hareketlerinin neden olduğu titreşimden elektrik enerjisi kazanılabilir ayrıca dünyadaki artan temiz enerji ihtiyacını karşılayabilmek ve doğaya zarar veren atık pillerin azaltılmasını sağlamak için de önemli bir adımdır. Piezoelektrik, elektromanyetik ve elektrostatik etki titreşimden enerji toplamak için farklı yöntemlerdir ve bu yöntemlerden piezoelektrik tabanlı titreşim yöntemi kolay uygulanabilirliği ve yüksek güç üretimi sebebiyle daha etkindir [6]. Yapılan araştırma ve çalışmalarda PEÜ'lerin, titreşimleri faydalı elektrik enerjisine dönüştürmede en uygun çözüm olduğu görülmüştür [7]. Erturk [8] piezoelektrik transdüksiyon kullanarak titreşime dayalı enerji kazanımı formüle etmiş ve bir köprünün rastgele bir konumunda kullanılmak üzere konsollu bimorph yapıda PEÜ modellemiştir. Bendine vd. [9] ise hareketli yüklere maruz kalan bir köprüden elde edilen enerji kazanım miktarlarını sonlu elemanlar modeli kullanarak, PEÜ'lerin konumları, yük hızı, yük frekansı gibi değişkenlere önemli derecede bağımlı olduğunu göstermiştir. Michael Peigney ve Dominique Siegert [10] PEÜ kullanarak ön gerilmeli beton bir otoyol köprüsünde araçların geçişinden kaynaklı oluşan titreşimlerden enerji elde etmiştir. Zhiwei Zhang vd. [11] hareketli harmonik yüke maruz kalan basit destekli bir kirişten piezoelektrik enerji kazanım problemi formüle etmiş ve PEÜ'lerin titreşim mod şekillerinin maksimum değerlerinin olduğu konumlara

kurulması gerektiği belirlenmiştir. Ye Zhang vd. [12] ANSYS programı üzerinde dört farklı köprü modelleyerek PEÜ'lerin konumları, araç sayıları, araç hızları ve yol koşullarının enerji üretimindeki etkisini incelemek için parametrik bir çalışma yapmış ve daha kötü yol koşulları, optimum araç hızları, PEÜ'lerin optimum konumları ile kazanılan enerji miktarının daha fazla olduğunu belirtmiştir.

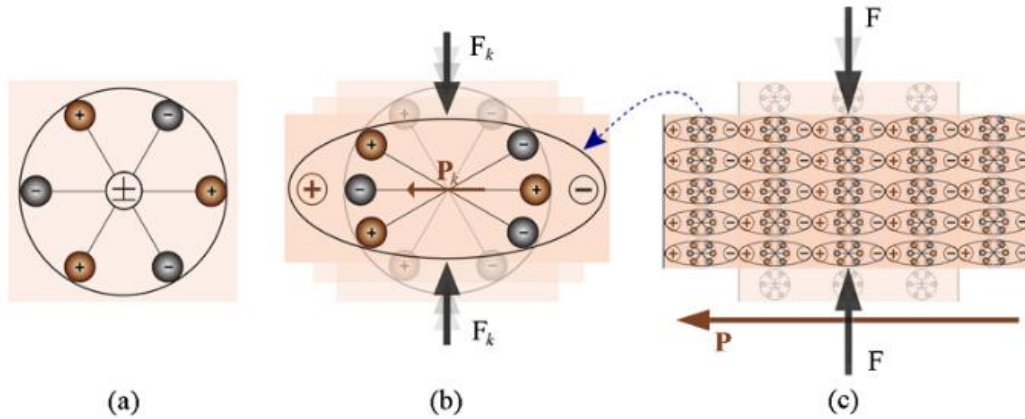
Yapılardaki mekanik titreşimlerden piezoelektrik malzemeler ile kazanılan elektrik enerjisi miktarının nasıl kullanılacağı ilgi çekici bir konu olmuştur [13]. Paul Cahill vd. sonlu elemanlar modeli oluşturarak tren geçişlerinin olduğu bir köprü yapıdan PEÜ ile enerji kazanımı gerçekleştirmiş ve elde edilen enerji miktarının yapıların sağlığını izlemede kullanılan kablosuz sensörlerin enerji ihtiyacını karşılamada yeterli olduğunu belirtmiştir. Diğer taraftan PEÜ'lerin kablosuz sensörlerin enerjisini karşılamının yanında trafik işaretleri, elektrik işaretleri, aydınlatma vb. için de kullanılabileceği de öngörülmektedir [14].

Bu tez çalışmasında, Elazığ'da bulunan Kuşsarayı-2 Köprüsü'nün boyutları ve özellikleri alınarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS paket programında gerçek ölçüleri ile modellenerek köprü üzerinden PEÜ ile enerji kazanımı ve bu üreteçlerin optimal konumlara yerleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda köprünün yüksüz durumdaki modal analizi yapılarak uygun doğal frekans aralıkları hesaplanmıştır. Daha sonra harmonik analiz ile araç yükü altındaki köprünün deformasyonun maksimum olduğu noktalar bulunarak o konumlara PEÜ'ler yerleştirilmiştir. Bu yerleşim noktalarındaki PEÜ'lerden üç farklı araç yükü ile toplanan enerji miktarları hesaplanmıştır. PZT tiplerinden de en uygun olanları araştırılarak çalışmanın literatür ile doğruluğu kıyaslanmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak gerçek bir köprüdeki PEÜ'lerin optimal konumları bulunmuş ve bu sayede üreteçlerden maksimum düzeyde enerji kazanımı sağlanmıştır.

2. PİEZOELEKTRİK

Piezoelektrik kelimesi Yunanca "baskılamak" anlamına gelen "piezein" kelimesinden gelir ve malzeme mekanik basınca maruz kaldığında bu piezoelektrik etkiyi gösteren özel bir malzemenin belirli yüzlerinde bir elektrik potansiyelinin görünümünü tanımlar. Burulma, sıkıştırma, kesme veya eğilme kuvvetleri elektrik yükünün yer değiştirmesine neden olur. Bu etki, simetrik olmayan birim hücreye sahip malzemelerde iyonların yer değiştirmesi ile açıklanır. Malzeme sıkıştırıldığında, her birim hücredeki iyonlar yer değiştirir ve birim hücrenin elektrik polarizasyonuna neden olur. Malzemenin yapısının düzenli olması nedeniyle, bu etkiler birikerek kristalin yüzlerine takılan elektrotlarda ölçülebilir bir elektrik potansiyeli farkının ortaya çıkmasına neden olur [15].

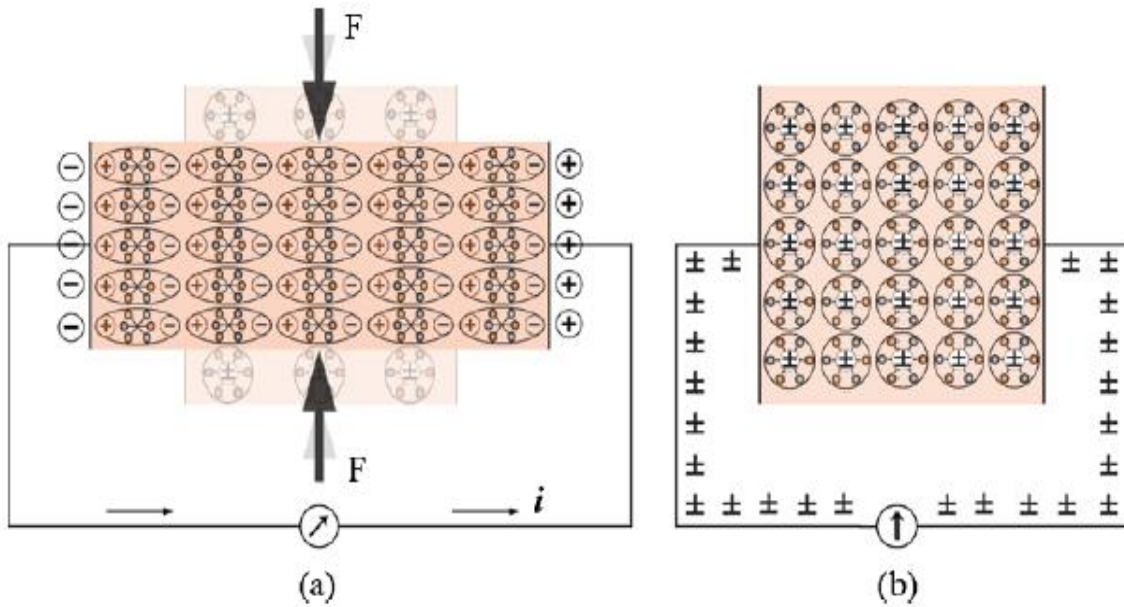
Şekil 2.1'de gösterilen basit bir moleküler modelle açıklanan piezoelektrik etki, malzemeye uygulanan bir kuvvetin sonucu olarak bir elektrik akımının üretilmesidir. Malzemeyi harici bir gerilime maruz bırakmadan önce, her molekülün negatif ve pozitif yüklerinin merkezleri çakışarak elektriksel olarak nötr bir molekül oluşturur. Bununla birlikte, bir dış mekanik kuvvetin varlığında, iç retiküler deforme olabilir, böylece molekülün pozitif ve negatif merkezlerinin ayrılmasına neden olur ve küçük dipoller oluşturur. Sonuç olarak, malzeme içindeki karşılıklı kutuplar birbirini bozar ve yüzeyde sabit yükler belirir. Yani malzeme polarize olur ve bu etkiye direkt piezoelektrik etki denir. Bu polarizasyon, malzemenin deformasyonunda kullanılan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılabilir bir elektrik alanı oluşturur [16].



Şekil 2.1. (a) Piezoelektrik polarizasyonu bozulmamış bir molekül (b) Molekülün bir dış kuvvete maruz kalması (c) Piezoelektrik malzeme bir dış kuvvete maruz kaldığında yüzeydeki polarizasyon etkisi [16].

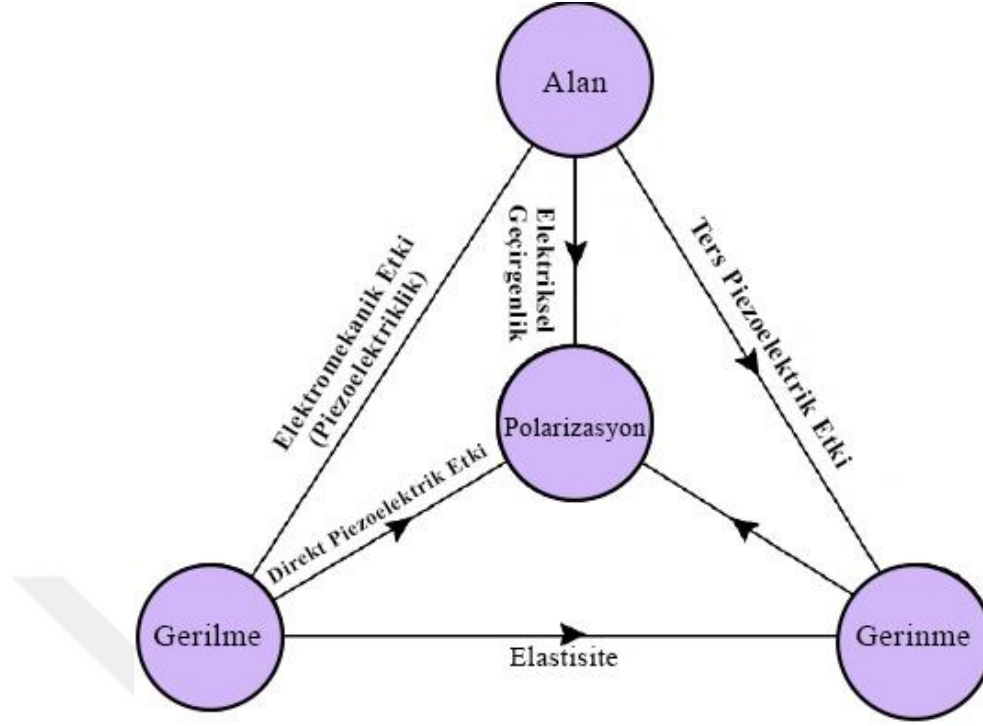
Şekil 2.2 zıt yüzeylere yerleştirilmiş iki metal elektrotlu piezoelektrik malzemeyi göstermektedir. Elektrotlar, kısa devre yapan tele bağlı bir galvanometre ile dışarıdan kısa devre yapılırsa ve piezoelektrik malzemenin yüzeyine kuvvet uygulanırsa, kristalin elektrotlarla temas

eden yüzeylerinde sabit bir yük yoğunluğu belirir. Bu polarizasyon, iletkende bulunan serbest yüklerin akışına neden olan bir elektrik alanı üretir. İşaretlerine bağlı olarak, serbest yükler polarizasyon tarafından üretilen sabit yüklerin zıt işaretli olduğu uçlara doğru hareket edecektir. Bu serbest yük akışı, serbest yük polarizasyon etkisini nötralize edene kadar devam eder. Bu, dış kuvvetin varlığından bağımsız olarak, kararlı durumda veya bozulmamış durumda hiçbir yükün akmadığı anlamına gelir. Malzeme üzerindeki kuvvet kaldırıldığında, polarizasyon da ortadan kalkar, serbest yüklerin akışı tersine döner ve sonunda malzeme orijinal duruma geri döner. Bu işlem, iki zıt işaretli akım tepe noktasını işaretleyen galvanometrede gösterilecektir. Kısa devre teli bir direnç/yük ile değiştirilirse, akım içinden geçer ve dolayısıyla mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür [16].



Şekil 2.2. Kısa devre akım akışı a) Dış kuvvete kaldığında b) Normal durumda [16].

Bazı malzemeler ayrıca ters piezoelektrik etki gösterir, yani elektrotlara bir voltaj uygulandığında malzemede mekanik bir deformasyon veya gerinme meydana gelir. Bu şekilde üretilen gerinim, birleştirilmiş mekanik yükün yerini değiştirmek için kullanılabilir. Elektrik enerjisini kullanılabilir mekanik enerjiye dönüştürmenin bu yolu, nano konumlandırma cihazları gibi uygulamalar için esastır. Piezoelektriklik olaylarının şeması Şekil 2.3'de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.3. Piezoelektriklik.

2.1. Piezoelektrik Tarihi

Basınç yoluyla elektrik enerjisi üretilebileceğine ilk gösterge 1815 yılında Coulomb tarafından sunulmuştur. Beş yıl sonra Hauy ve Becquerel yaptığı deneyler sonucunda basınç yoluyla üretilen elektriksel yüklerin sürtünme veya temas elektrikliğine bağlı olabileceğini öne sürmüştür. Piezoelektrik olayı 1880 yılında Pierre ve Jacques tarafından turmalin, Rochelle tuzu, topaz ve kuvars kristalleri kullanılarak keşfedilmiştir. Piezoelektrik ilk olarak 1917'de Langevin ve çalışma arkadaşları tarafından 1. Dünya Savaşı sırasında denizaltıları tespit etmek ve derinliklerini ölçmek için bir piezoelektrik dönüştürücü tasarlanarak kullanıldı. İki çelik plaka arasına ince kuvars kristalleri yapıştırılarak tasarlanan bu dönüştürücü ses dalgalarıyla cisimlerin boyutları ve mesafeleri hakkında ölçümler yapabilen sonar cihazların gelişimini başlatmıştır. Piezoelektrik dönüştürücüler 1. Dünya Savaşı'ndaki başarısından dolayı hem rezonanslı hem de rezonanssız her türlü piezoelektrik cihazın gelişimini arttırmıştır. Ultrasonik dalgaların yayılmasına bağlı olarak malzemelerin kalitesini test eden yeni bir metot geliştirmiştir. İlk kez sıvıların ve gazların elastik ve viskoz özellikleri kolaylıkla belirlenebilmiş ve katı metal yapı elemanlarında önceden görülmeyen kusurlar tespit edilebilmiştir. Akustik holografik teknikler bile başarıyla gösterilmiştir. Ayrıca, daha önce ölçülemeyen titreşimler, hızlanmalar ve darbelerle birlikte patlayıcı maddeler ile içten yanmalı motorların çalışmasını sağlayan yeni basınç ölçüm aralıkları ortaya çıkmıştır. 1. Dünya Savaşı'nı takip eden bu gelişmeler sonrasında mikروفon, ivmeölçer, ultrasonik dönüştürücü ve sinyal filtreleri gibi birçok cihaz yaygınlaşmıştır [17,18].

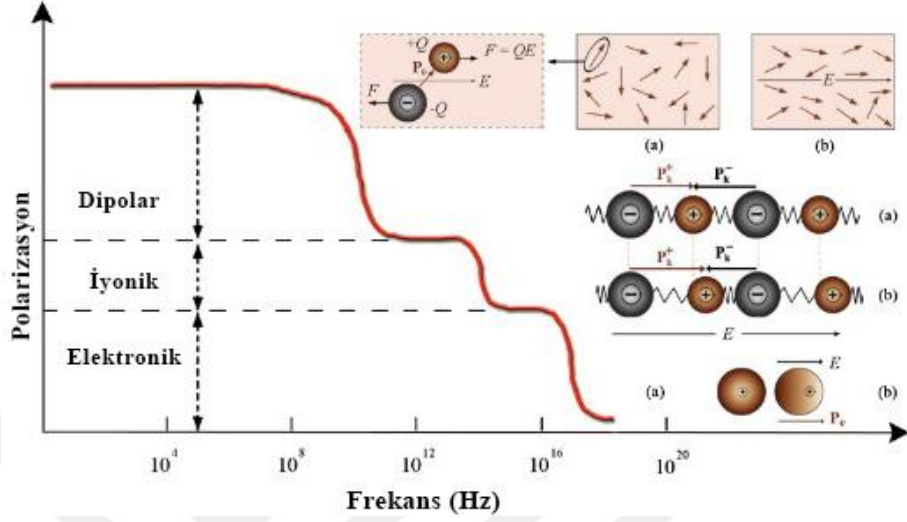
İkinci Dünya Savaşı sırasında, ABD, Japonya ve Sovyetler Birliği'nde, iyileştirilmiş kapasitör malzemeleri üzerinde çalışan araştırma grupları, belirli seramik malzemelerin, yaygın kristallerinden 100 kata kadar daha yüksek dielektrik sabitleri olduğunu keşfetmiştir. Yüksek performans özelliklerine sahip, kolayca üretilen piezoelektrik seramiklerin keşfi, piezoelektrik cihazların geliştirilmesine olan ilginin arttırmıştır. Piezo seramiklerden baryum titanat ($BaTiO_3$) ve kurşun zirkonat titanatın (PZT) gelişimi, perovskit kristal yapısının elektromekanik aktiviteye uygunluğunun anlaşılması ve piezoelektrik bağlantı katsayısı, dielektrik sabiti ile sertlik gibi belirli özelliklerin elde edilmesi piezoelektrik malzeme bilimindeki önemli gelişmeler olmuştur. Piezo seramiklerin boyutları ve geometrilerinin ayarlanması yeni piezoelektrik cihazların oluşturulmasını teşvik etmiştir. Japonya, 1965 ve 1980 yılları arasındaki dönemde piezoelektrik malzemeler ve cihazlar açısından büyük bir başarı elde etmiştir. Bu yıllarda, seramiklerin sert doğasının sınırlarının oynatılması, poliviniliden florürün (PVDF) geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. 1980'den günümüze kadar yapılan çalışmaların çoğu, güvenilirliği ve katı hal hareketini artırarak düşük güç uygulamaları üzerinde yoğunlaşmıştır [17,18].

2.2. Elektrik Polarizasyon

Bir katıya dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında katı çekirdeklerin ve elektronların konumlarını değiştirerek bu olaya uyum sağlar. Sonuç olarak, dipoller oluşur ve malzemenin polarizasyona uğradığı söylenir. Elektrik alan şiddeti (E) olan bir dış elektrik alanının etkisi altında dipol oluşumu sürecine polarizasyon denir. Üç ana polarizasyon türü veya kaynağı vardır; elektronik, iyonik ve dipolar polarizasyon. Dördüncü bir polarizasyon kaynağı, elektrotlarda ve grain (tane) sınırları gibi heterojenliklerde meydana gelen arayüzey polarizasyondur. Alternatif bir elektrik alanı için, her bir mekanizmanın malzemenin genel polarizasyonuna katkıda bulunma derecesi, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi uygulanan alanın frekansına bağlıdır. Uygulanan alan frekansı gevşeme frekansını aştığında her bir polarizasyon mekanizması işlevini sonlandırır [16].

Elektronik polarizasyon, tüm atomlarda bir dereceye kadar indüklenebilir. Şekil 2.4'ün sağ altında gösterildiği gibi bir atomun pozitif çekirdeğine göre negatif yüklü elektronların merkezinin elektrik alanı tarafından yer değiştirmesinden kaynaklanır. Bu polarizasyon tipi tüm dielektrik malzemelerde bulunur ve yalnız bir elektrik alan olduğunda mevcuttur. İyonik polarizasyon sadece iyonik olan maddelerde gerçekleşir. Uygulanan alan, katyonları bir yönde ve anyonları zıt yönde değiştirerek net dipol momentine neden olur. Bu olay Şekil 2.4'ün sağ tarafının ortasında gösterilmektedir. Üçüncü tip olan dipolar polarizasyon ise yalnızca kalıcı dipol momentlere sahip maddelerde bulunur. Polarizasyon Şekil 2.4'ün sağ üstünde gösterildiği gibi sabit momentlerin uygulanan alan yönüne dönmesinden kaynaklanır. Bir maddenin toplam elektrik polarizasyonu, elektronik, iyonik ve dipolar polarizasyonlarının toplamına eşittir. Bu katkılardan bir veya daha

fazlasının, toplam elektrik polarizasyonuna veya diğerlerine göre çok küçük olması durumunda ihmal edilebilir [16].



Şekil 2.4. Çeşitli polarizasyon mekanizmalarının frekans bağımlılığı [16].

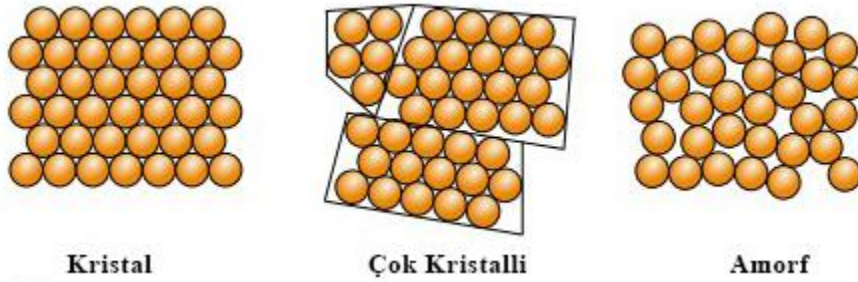
2.3. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler doğal veya yapay olabilir. Doğal piezoelektrik malzemeler; kuvars (SiO_2), Rochelle tuzu, topaz, turmalin grubu mineraller ile ipek, ahşap, kemik, saç, kauçuk gibi bazı organik maddeler kristal malzemelerdir. Piezoelektrik malzemeler; piezoelektrik tek kristaller, piezoelektrik seramikler, ince filmlili piezoelektrik malzemeler, piezoelektrik polimerler ve piezoelektrik kompozitler olarak beş ayrı sınıfta incelenir.

Piezoelektrik malzemeler, doğrudan ve ters piezoelektrik etkileri kullanan kalın ve ince film cihazlarına dayalı aktif ve pasif dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif dönüştürücülerde, piezoelektrik malzeme, akustik alan, yer değiştirme veya basınç oluşumunda kullanılır. Pasif dönüştürücülerde malzeme, akustik basıncı yüksek hassasiyetle algılamak için bir sensör olarak kullanılır. Ancak her iki durumda da dönüştürücülerin performansı piezoelektrik malzemenin bozulması nedeniyle kararsız veya tutarsız olabilir. Aktif dönüştürücülerde, piezoelektrik malzeme, dönüştürücü içinde hangi yüksek dinamik gerilimin üretildiğine bağlı olarak yüksek akustik güç çıkışı üretmek için yüksek bir elektriksel enerji alanına maruz kalabilir ve kayıp etkilerinden dolayı sıcaklık artabilir. Pasif uygulamalarda, olağanüstü şartlar altında piezoelektrik malzemeler ortamdaki ısı iletiminin neden olduğu sıcaklık artışlarından, deniz uygulamalarındaki yüksek basınç seviyelerinden ve dönüştürücü montajı sırasında ön yüklemeye zarar görebilir [19].

2.3.1. Piezoelektrik Tek Kristaller

Tek kristaller, Şekil 2.5’de görüldüğü gibi polikristalin ve amorf malzemelerin aksine, tüm cisim boyunca kurucu atomların veya iyonların mükemmel yakın bir periyodik düzenlemesi ile karakterize edilir. Tek bir kristalin piezoelektrik davranış gösterip göstermediği, kristal yapının simetri özelliklerine bağlıdır. Piezoelektrik kristal sınıflarının yarısı kendiliğinden polarizasyon sergiler. Bir elektrik alan veya mekanik gerilim yokluğunda bile, pozitif ve negatif yük merkezleri kesişmez, bu da her birim hücrede yerleşik bir elektrik dipole yol açar. Kendiliğinden polarizasyona sahip kristallerin polar veya piroelektrik olduğu söylenir. Piroelektrik, piezoelektrik anlamına gelir, ancak piezoelektrik piroelektrik anlamına gelmez. Örneğin kuvars kristalleri piezoelektriktir, ancak piroelektrik değildir. Turmalin, hem piezoelektrik hem de piroelektrik olan bir malzemeye örnektir. Piroelektrik, sıcaklıktaki bir değişiklik nedeniyle yük üretimidir. Kendiliğinden polarizasyona sahip olmayan tek kristalli malzemelere polar olmayan veya paraelektrik denir [20].



Şekil 2.5. Atomların ve iyonların polarizasyonuna göre katıların sınıflandırılması [20].

Bazı piroelektrik malzemelerin polarizasyon yönü, yeterince büyük bir elektrik alan uygulanarak değiştirilebilir. Bu durumda, gerekli elektrik alan kristalin kırılma sınırını aşmıyorsa, malzemenin de ferroelektrik olduğu söylenir. Yalnızca ferroelektrik kristal grubunun bilgisi piezoelektrik ve piroelektrikten farklı olarak, ferroelektrikliği oluşturmak için yeterli değildir. Bu amaçla, dielektrik ölçümleri gereklidir. Ferroelektrik malzemeler, Curie sıcaklığı adı verilen ve bunun üzerinde birim hücrenin sentrosimetrik (merkeze simetrik konumda olan) olduğu ve dolayısıyla piezoelektriklik ve ferroelektriklik göstermediği bir geçiş sıcaklığına sahiptir. Malzemenin daha sonra bir paraelektrik fazda olduğu söylenir. Bir ferroelektrik kristal, Curie sıcaklığı boyunca soğuduğunda, sözde ferroelektrik bozulmaya uğrar. Birim hücre simetrisinin bir kısmını kaybeder ve bir elektrik dipolu oluşur. Birim hücre içindeki polar ekseninin olası yönleri, belirli ferroelektrik bozulmaya bağlıdır. Curie sıcaklığı boyunca soğutulduktan sonra, bir ferroelektrik kristal tarafında birkaç Weiss alanı ortaya çıkar. Bunlar, alan duvarlarıyla ayrılmış, tek tip bir polarizasyona sahip bölgelerdir. Her biri kendi polarizasyon yönüne sahip olan özel alan deseni, Curie sıcaklığında oluşturulan gerilimlerin, dengelenmemiş yüzey yüklerinin ve kristal

içindeki fiziksel kusurların bir sonucudur. Kendiliğinden tek alanlı kristaller nadirdir. Bu nedenle, genel olarak, bir ferroelektrik kristal, makroskopik bir polarizasyon göstermez. Ferroelektrik, piroelektrik anlamına gelir ancak piroelektrik ferroelektrik anlamına gelmez. Örneğin, turmalin piroelektriktir ancak ferroelektrik değildir. Rochelle tuzu ise ferroelektrik olduğu kadar piroelektrik olan bir malzeme örneğidir [20].

Piezoelektrik tek kristallerden kuvars (Şekil 2.6) doğal olduğu gibi yapay olarak da yapılabilir. Mücevheratta kullanımlarında, doğal kuvarsın görünümü olarak yapay kuvarstan çok daha fazla gösterişlidir. Bununla birlikte, doğal kuvarsın kristal yapısı, tipik olarak, teknik piezoelektrik cihazlar için ideal olarak minimumda tutulması gereken küçük düzensizliklerden etkilenir. Yapay kuvars, minimum düzensizliklere sahip olacak şekilde, iyi kontrol edilerek hidrotermal bir işlemle büyütülebilir. Bu nedenle, günümüzde tüm kuvars bazlı piezoelektrik cihazlar yapay kuvars kristallerinden yapılmaktadır [20].



Şekil 2.6. Kuvars [21].

Piezoelektrik seramikler genel olarak polikristal malzemeleri ifade eder. 0,7 gibi yüksek kaliteli bir bağlantı katsayısına sahiptir. Bununla birlikte, ferroelektrik seramikler, polikristalin seramiklerin üzerinde bile üstün piezoelektrik davranış sağlayan tek kristaller olarak üretilebilir. Tek kristal seramikler 0,9 gibi son derece yüksek bir bağlantı katsayısına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır [20].

2.3.2. Piezo Seramikler

Piezoelektrik malzemelerin önemli bir grubu olan piezo seramikler günümüzde en yaygın kullanılan piezoelektrik malzemelerdir. Piezo seramikler fiziksel olarak güçlü, kimyasal olarak atıl oldukları ve imalatları nispeten ucuz oldukları için tercih edilen seçimdir. Piezo seramikler

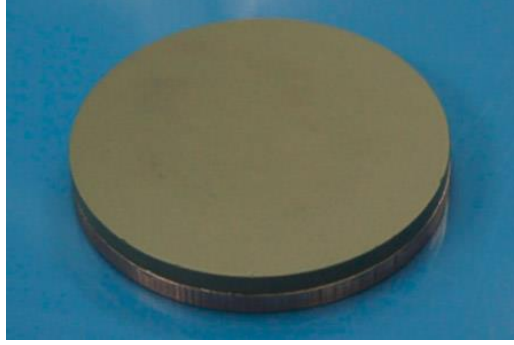
polikristal yapılara sahip ferroelektrik malzemelerdir. Kurşun zirkonat titanat (PZT), baryum titanat (BaTiO_3), kurşun titanat (PbTiO_3), potasyum niyobat (KNbO_3), lityum niyobat (LiNbO_3), lityum titanat (LiTaO_3) ve çinko oksit (ZnO) piezo seramiklerden bazılarıdır. Bunlardan PZT, üstün performansı nedeniyle en yaygın kullanılanıdır. Ancak, kurşunun toksisitesi, PZT kullanımına ilişkin endişeleri artırmış ve kurşun kullanımlarında sınırlandırılmalar vardır [22].

Piezoelektrik tek kristaller hala belirli uygulamalarda kullanılıyor olsa da piezoelektrik cihazların büyük çoğunluğu, iyileştirilmiş piezoelektrik özelliklerle geliştirilmiş polikristal seramiklere dayanmaktadır. Polikristal seramiklerin en büyük faydası hemen hemen her boyut ve şekilde hazırlanabilmeleridir. En yaygın seramikler polikristaldir, taneler olarak adlandırılan birçok küçük tek kristalin toplanmasıdır (Şekil 2.5). Basit bir deyişle, piezo seramikler, katı bir gövde oluşturmak için birleştirilmiş küçük taneler olarak görülebilir. Seramikler; tuğla, fayans, porselen, sağlık gereçleri gibi geleneksel seramikler ve mühendislik sistemlerinde kullanılan teknik seramikler olarak ikiye ayrılır. Teknik seramikler balistik koruma plakalar, biyomedikal implantlar, disk frenleri ve mekanik yataklar gibi birçok çok çeşitli formlarda mevcuttur. Genellikle bu seramiklerde kullanılan hammaddeler geleneksel seramiklerdeki gibi kil değil, yüksek kaliteli tozlardır. Teknik seramiklere elektro seramik denilebilir. Teknik seramikler bileşimine ve kristal yapısına bağlı olarak benzersiz elektriksel, manyetik veya optik özelliklere sahiptir. Elektro seramikler çok çeşitli malzemeleri kapsar. En çok kullanılan piezoelektrik seramikler, baryum titanat (BaTiO_3) ve kurşun zirkonyum titanat (PZT) bazlıdır. Diğer birçok ferroelektrik seramik gibi, bu malzemelerin her ikisi de perovskit kristal yapısında kristalleşir [20].

Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi kurşun oksit bazlı ferroelektrik malzemeler, iyi piezoelektrik özelliklerinden dolayı aktüatörler, sensörler ve dönüştürücüler gibi elektronik cihazlar için yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bununla birlikte, kurşunun (Pb) çevresel ve sağlıkla ilgili tehlikeleri iyi bilinmektedir ve kurşun bazlı piezoelektrik malzemeler içeren cihazların geri dönüşümü ve yok edilmesi büyük endişe kaynağıdır. Avrupa ve Çin önderliğinde tehlikeli maddelerin kısıtlanması için birçok hükümet düzenlemesi çıkarılmış ve kurşun dahil olmak üzere elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kullanılan tehlikeli maddeler kısıtlanmıştır. Alternatif malzeme bulunmadığından, PZT piezo seramikleri düzenlemelerden muaf tutulmuştur. Bununla birlikte, kurşunsuz piezoelektrik malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine yönelik ilgi artmıştır. Perovskit, tungsten-bronz ve bizmut katmanlı yapılara dayalı olarak kurşunsuz piezoelektrik malzemelerin üç ana ailesi aktif olarak araştırılmıştır. Ancak, bu kurşunsuz piezoelektrik malzeme türlerinin hiçbiri şu anda PZT bazlı malzemelerin yerini alabilecek özelliklere sahip değildir [20].

PZT olarak adlandırılan kurşun zirkonat titanat $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ dünyanın en yaygın kullanılan piezoelektrik seramik malzemelerinden biridir, Şekil 2.7'de gösterilmiştir. PZT, 1952 civarında Tokyo Teknoloji Enstitüsü'ndeki bilim adamları tarafından geliştirilen metalik oksit bazlı bir

piezoelektrik malzemedir. Daha önce keşfedilen metalik oksit bazlı piezoelektrik malzeme baryum titanat ($BaTiO_3$) ile karşılaştırıldığında, PZT malzemelerinin daha yüksek hassasiyet gösterdiği ve daha yüksek bir çalışma sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür [23].



Şekil 2.7. PZT [24]

Baryum titanat ($BaTiO_3$) ticari uygulamalar için geliştirilen ilk ferroelektrik ve piezoelektrik seramik olmuştur ve özellikle çok katmanlı seramik kapasitörlerde yüksek geçirgenliğe sahip bir dielektrik olarak ve pozitif sıcaklık direnç katsayısına (PTCR) sahip termistörlerde yarı iletken bir malzeme olarak hala yaygın olarak kullanılmaktadır [25]. Şekil 2.8’de Baryum titanat görseli verilmiştir.



Şekil 2.8. Baryum titanat [26].

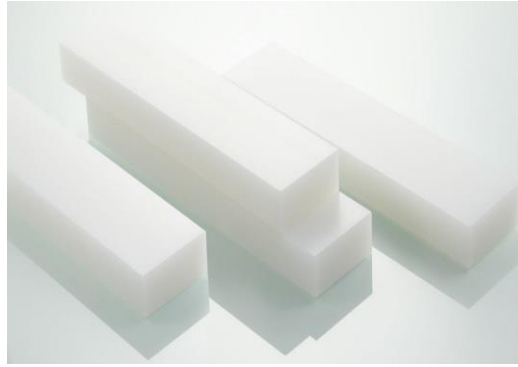
2.3.3. İnce Filmler Piezoelektrik Malzemeler

Geleneksel piezo teknolojisinde tozlar, dökme seramiklere sinterlenir. Öğütme, kesme ve yapıştırma gibi kaba teknikler kullanılarak işlenir. Ancak bu yöntemler, bir milimetrenin çok altındaki uzunluk ölçeklerinde uygun değildir ve bu nedenle farklı bir yaklaşım uygulanır. Doğru desenleme teknikleri ile birlikte bir alt tabaka üzerine bir piezoelektrik malzeme tabakası yerleştirilerek, piezoelektrik aktüatörler ve sensörler gibi piezoelektrik cihazlar üretilebilir. İnce

film teknolojisi, aynı anda binlerce aktüatör veya algılama cihazını üretebilir ve bu da cihaz başına maliyette ciddi bir düşüşe yol açar. Ortaya çıkan cihazlar, yüksek hassasiyet, düşük güç tüketimi ve nispeten basit çalışma ile tanımlanır. İnce film cihazlarının çoğu, mikro elektro mekanik sistemlere (MEMS) dahil edilen piezoelektrik filmlere dayanmaktadır. Bu amaçla AlN, ZnO ve Pb(Zr,Ti)O₃ ince filmleri geniş çapta incelenmiştir. AlN ve ZnO'nun ince filmleri genel olarak akustik dalga cihazlarının imalatı için kullanılırken, perovskit seramik PZT'nin ince filmleri, mükemmel piezoelektrik özellikler gösterdiğinden örnek olarak jiro sensörlerin ve mürekkep püskürtmeli yazıcı başlıklarının imalatı için kullanılır. PiezoMEMS uygulamalarına yazıcılar, piezoelektrik mikro işlemci ultrason dönüştürücüler, mikro valfler, mikro aynalar ve enerji kazanım makineleri gibi birçok cihaz örnek olarak verilebilir [20].

2.3.4. Piezo Polimerler

Piezo polimerler, piezo seramiklere göre çok daha yüksek esnekliğe sahip olan önemli bir piezoelektrik malzeme grubudur. Polisakkaritler, proteinler ve polinükleotitler gibi doğal polimerler bazı piezoelektrik özellikler göstermiştir. Polimerler, iplik ve kumaş oluşturma yetenekleri nedeniyle diğer malzemelere göre üstün avantajlara sahiptir. Polivinilidin florür (PVDF), polimerlerden en büyük piezoelektrik etkisini sergileyen polimerdir ve tekstil uygulamaları için oldukça uygun bir malzemedir [22]. Polivinilidin florür (PVDF) Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. PVDF görünümü [27].

2.3.5. Piezo Kompozitler

Bazı malzemeler mükemmel piezo özelliklere sahip olabilir ancak özelliklerinden dolayı belirli uygulamalar için uygun değildir. Piezo seramikler, kırılabilirliğinden dolayı bu tür malzemelerin klasik bir örneğidir. Bu gibi durumlarda, piezo seramiklerden oluşan bir piezo kompozit oluşturulabilir. Bunlar çubuk, küp ve kabuk yapıları gibi çeşitli şekil ve geometrilerde düzenlenebilir [22].

2.4. Piezoelektrik Malzeme Parametreleri

Piezoelektrik malzemelerin analizi için başlangıç noktası genellikle bir çift doğrusal temel denklemdir [28]. Doğrusal temel denklemler Denklem 2.1 ve 2.2’de gösterilmiştir.

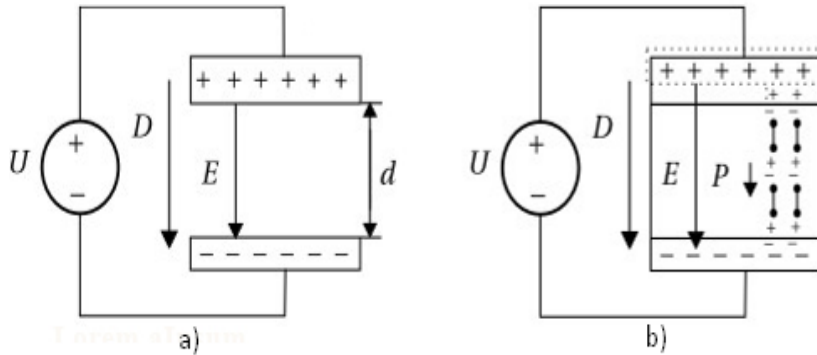
$$S = s^E T + dE \quad (2.1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2.2)$$

- T : Gerilim
 S : Elastik gerinim
 ε : Malzemenin geçirgenliği
 D : Elektrik yer değiştirmesi
 E : Elektriksel alan
 d : İletken plakalar arasındaki mesafe

2.4.1. Elektromekanik Davranış

Piezoelektrik malzemelerdeki elektromekanik etkileşimi tanımlanmadan önce, iki iletken plaka örneğini düşünülerek ilk olarak boş alandaki elektrostatikler ele alındı (Şekil 2.10). Plakalarda dik homojen bir elektrik yer değiştirme alanı varsayıldığında, plakalar arasındaki boş alanda elektrik alanı, elektrik yükünün dağılımı ile Denklem 2.3-2.6’daki gibi ilişkilidir [28].



Şekil 2.10. Bir iletken plakanın elektriksel davranışı a) Boş alanda b) Dielektrik ortamda [28].

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2.3)$$

$$|\vec{D}| = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

$$|\vec{E}| = \frac{U}{a} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)} \quad (2.6)$$

\vec{D}	: Elektrik yer değiştirmesi (C/m ²)
\vec{E}	: Elektriksel alan (V/m)
ϵ_0	: Boş alandaki geçirgenlik (F/m)
Q	: İletken plakalardaki yk (C)
A	: İletken plakaların kesiti (m ²)
U	: Plakalar arasındaki voltaj veya elektrik potansiyeli farkı (V)
d	: İletken plakalar arasındaki mesafe (m)

İki paralel iletken plaka arasındaki bir dielektrik ortam için, elektrik alanı ve elektrik yükünün dağılımları arasındaki ilişki biraz daha karmaşıktır. Bunun nedeni, dielektrik malzeme içinde bağlı elektrik yüklerinin, yani serbestçe hareket edemeyen yüklerin bulunmasıdır. Bir elektrik alanının uygulanması, bu bağlı yüklerin yeniden dağıtılmasıyla sonuçlanır, böylece malzeme içinde bölgesel olarak elektrik dipolleri üretilir. Makroskopik düzeyde dipollerin birikmesine polarizasyon denir [28].

Polarizasyon nedeniyle, serbest yüklerin bir kısmı dielektrik ortamın dipolne bağlanacak ve plakalar üzerinde daha az net yük bırakacaktır (Denklem 2.7).

$$Q_{net} = Q_{serbest} - Q_{pol} \quad (2.7)$$

$Q_{serbest}$: \vec{D} ile ilgili iletken plakalar üzerindeki serbest yük Denklem 2.8’de ifade edilmiştir.

$$Q_{serbest} = A|\vec{D}| \quad (2.8)$$

Q_{net} : \vec{E} elektrik alanı ile ilgili iletken plakalar üzerindeki net yük Denklem 2.9’daki gibidir.

$$Q_{net} = A\epsilon_0|\vec{E}| \quad (2.9)$$

Q_{pol} : Dielektrik ortamın polarizasyonunu dengeleyen iletken plakalar üzerindeki yük Denklem 2.10’da verilmiştir.

$$Q_{pol} = A|\vec{P}| \quad (2.10)$$

\vec{P} : Polarizasyon (C/m²)

Doğrusal, izotropik bir dielektrik ortam için polarizasyon, Denklem 2.11’deki gibi verilmiştir.

$$\vec{P} = \epsilon_0\chi_e\vec{E} \quad (2.11)$$

χ_e : Malzemenin elektriksel duyarlılığı

Polarizasyon Denklem 2.7’de yerine yazılırsa, elektrik yer değiştirme Denklem 2.12’deki gibidir.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.12)$$

Doğrusal, izotropik bir dielektrik ortam (Denklem 2.11) için, gerilmemiş bir dielektrik malzemenin elektrik davranışını tanımlayan bağıntılar Denklem 2.13-2.15’de verilmiştir.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.13)$$

ε : Malzemenin geçirgenliği (F/m)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.14)$$

ε_r : Malzemenin dielektrik sabiti

$$\varepsilon_r = 1 + x_e \quad (2.15)$$

Elektrik alanı olmayan bir yere yerleştirilmiş bir dielektrik malzemenin mekanik, elastik davranışı Denklem 2.16’ da verilmiştir.

$$\vec{S} = s \vec{T} \quad (2.16)$$

\vec{S} : Gerinim, bağıl deformasyon (Denklem 2.17)

$$s = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.17)$$

Δl : Mutlak deformasyon

l : Bileşenin orijinal uzunluğu

\vec{T} : Gerilme, birim alan başına kuvvet (N/m²), Denklem 2.18’de verilmiştir.

$$T = \frac{F}{A} \quad (2.18)$$

F : Bileşene uygulanan kuvvet (N)

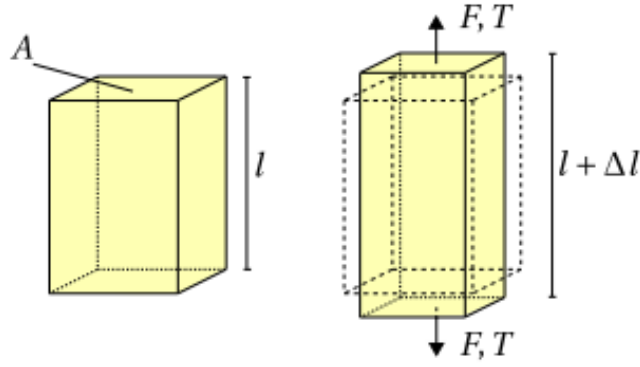
A : Bileşenin kesiti (m²)

s : Malzemenin uygunluğu (m²/N), Denklem 2.19’da verilmiştir.

c : Elastite modülü (N/m²)

$$s = c^{-1} \quad (2.19)$$

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi, belirli bir yönde aksenal bir yük uygulandığında, malzeme bu eksen boyunca gerilir ancak aynı zamanda dikey yönlerde deforme olur. Dikey gerilmenin aksenal gerilmeye oranı, genellikle sembolü ν ile gösterilen bir malzeme özelliği olan Poisson oranı ile verilir [28].



Şekil 2.11. Elastik Davranış [28].

Piezoelektrik malzemeler için, elektrik ve mekanik temel denklemler, Denklem 2.13 ve Denklem 2.16 ile Denklem 2.20’de birleştirilir. Mekanik gerilmenin uygulanması bir deformasyon oluşturur ve doğrudan piezoelektrik etki yoluyla elektrik polarizasyonuna neden olur [28].

$$\vec{P}_{piezo} = d\vec{T} \quad (2.20)$$

\vec{P}_{piezo} : Mekanik olarak endüklenen polarizasyon (C/m²)

d : Piezoelektrik yük sabiti (C/N)

Elektrik alan olmazsa, elektrik yer değiştirme piezoelektrik polarizasyona eşittir (Denklem 2.21).

$$\vec{D}|_{\vec{E}=0} = \vec{P}_{piezo} = d\vec{T} \quad (2.21)$$

Şekil 2.10 incelendiğinde elektrotlardaki serbest yük, mekanik gerilme tarafından indüklenen polarizasyon yüküne eşittir. Sıfır olmayan bir elektrik alan için toplam elektrik yer değiştirmesi Denklem 2.22’de verilmiştir.

$$\vec{D} = \epsilon^T \vec{E} + d\vec{T} \quad (2.22)$$

Burada geçirgenlik için üst simge olan T, mekanik sınırı gösterir.

ϵ^T : Sabit gerilme altındaki geçirgenlik

Tersi düşünüldüğünde, bir piezoelektrik malzemeye bir elektrik alanının uygulanması, bir elektrik yer değiştirmesine (Denklem 2.13) neden olur ancak malzeme içindeki ilişkili mekanik gerilme, uygulanan elektrik alanıyla doğrusal olarak ilişkili olan bir deformasyona da neden olur. Mekanik gerilme uygulanmadığında, ters piezoelektrik etki Denklem 2.23’de tanımlanmıştır:

$$\vec{S}|_{\vec{T}=0} = d^T \vec{E} \quad (2.23)$$

Dışarıdan mekanik gerilim olduğunda ise toplam gerinim Denklem 2.24 deki gibi verilmiştir.

$$\vec{S} = s^E \vec{T} + d^T \vec{E} \quad (2.24)$$

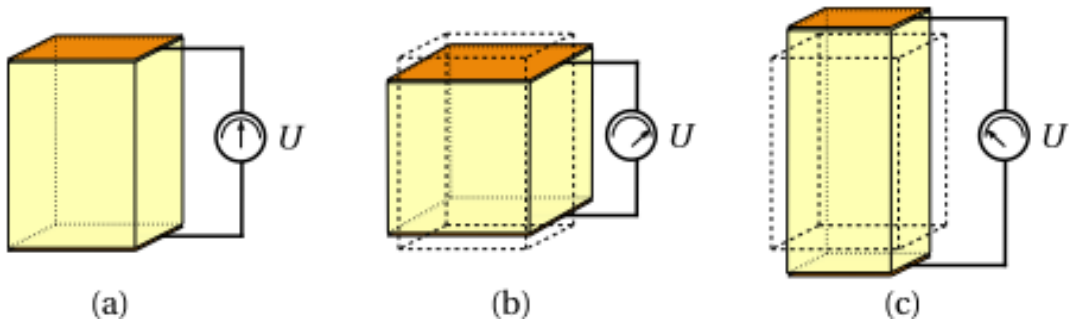
Denklem 2.24'te kullanılan üst simge elektrik sınır koşulunu belirtir.

s^E : Sabit elektrik alan için uyum

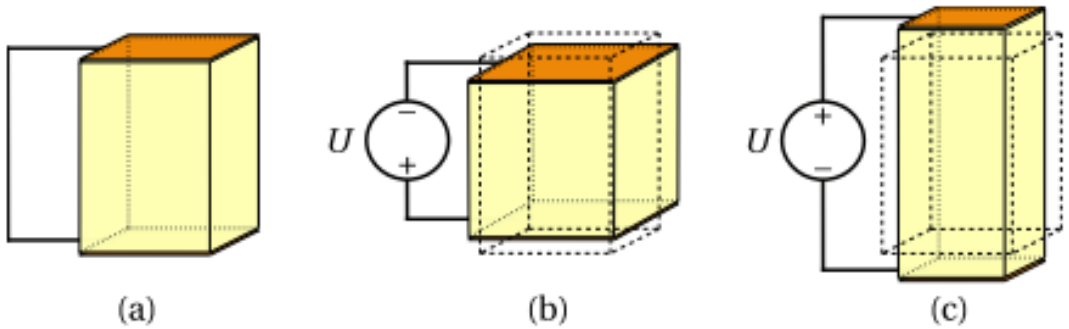
Piezoelektrik yük sabiti (d), uygulanan gerilme başına indüklenen polarizasyon ve uygulanan alan başına indüklenen gerinimi temsil eder. Piezoelektrik yük sabiti bu nedenle, direkt etki (C/N) ve ters etki (m/V) olarak iki birimde ifade edilebilir. Her iki birimin de aynı olduğu söylenebilir. Direkt ve ters piezoelektrik etki büyüklük olarak eşittir. Eşitlik, termodinamik ilkelerden teorik olarak kanıtlanabilir [28].

Şekil 2.12 ve 2.13, piezoelektrik malzemeden yapılmış bir bileşenin temel davranışını göstermektedir. Şekil 2.12a, bileşeni yük­süz koşullar altındaki göstermektedir. Bir dış kuvvet malzemede sıkıştırma veya çekme gerilimi oluşturursa, polarizasyonda meydana gelen değişiklik elektrotlarda bir elektrik yükünün görünmesine neden olur.

Şekil 2.12b ve 2.12c'de belirtildiği gibi, yükün polaritesi uygulanan kuvvetin yönüne bağlıdır. Şekil 2.13, ters etkiyi göstermektedir. Bir elektrik alanının uygulanması, piezoelektrik bileşenin uygulanan alan doğrultusunda Şekil 2.13b'deki gibi ya kısalmasına ya da Şekil 2.13c'deki gibi uzamasına neden olur. Uzunluğun tekrar artması veya azalması uygulanan alanın polaritesine bağlıdır [28].



Şekil 2.12. Dikdörtgen şekilli bir bileşendeki direkt piezoelektrik etki [28].



Şekil 2.13. Dikdörtgen şekilli bir bileşendeki direkt piezoelektrik etki [28].

2.4.2. Piezoelektrik Temel Denklemler

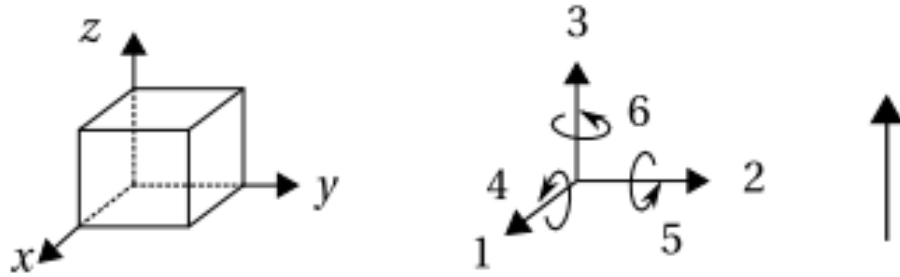
Piezoelektrik denklemlerin birleşimi, piezoelektrik malzemelerin davranışı için matris formundaki standart anlatımdır, Denklem 2.25’de verilmiştir [28].

$$\begin{pmatrix} \vec{S} \\ \vec{D} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d^T \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{T} \\ \vec{E} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Doğal olarak anizotropik olan piezoelektrik malzemelerin üç boyutlu davranışını doğru bir şekilde tanımlamak için yukarıdaki parametreler tensör büyüklükler olarak kabul edilmelidir. Tensör formüllerini değiştirmek için basitleştirilmiş matris formülleri kullanılabilir [28].

Gerinim ve gerilme Şekil 2.14’de gösterildiği gibi de altı elamandan oluşan vektörlerdir. Normal deformasyonu gösteren ilk üç eleman x, y ve z eksenleridir. İkinci üç eleman x, y ve z eksenleri ise kayma deformasyonunu gösterir. Elektrik yer değiştirmesi ve elektrik alan, x, y ve z eksenleri ile ilişkili vektörlerdir [28].

Matris notasyonunda elektrik, elastik ve piezoelektrik davranışın tam açıklaması Denklem 2.26’daki gibi verilmiştir.



Şekil 2.14. Eksenlerin ve deformasyon yönlerinin belirlenmesi [28]

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & S_{14}^E & S_{15}^E & S_{16}^E & d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ S_{21}^E & S_{22}^E & S_{23}^E & S_{24}^E & S_{25}^E & S_{26}^E & d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ S_{31}^E & S_{32}^E & S_{33}^E & S_{34}^E & S_{35}^E & S_{36}^E & d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ S_{41}^E & S_{42}^E & S_{43}^E & S_{44}^E & S_{45}^E & S_{46}^E & d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ S_{51}^E & S_{52}^E & S_{53}^E & S_{54}^E & S_{55}^E & S_{56}^E & d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ S_{61}^E & S_{62}^E & S_{63}^E & S_{64}^E & S_{65}^E & S_{66}^E & d_{16} & d_{26} & d_{36} \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & \varepsilon_{11}^T & \varepsilon_{12}^T & \varepsilon_{13}^T \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & \varepsilon_{21}^T & \varepsilon_{22}^T & \varepsilon_{23}^T \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & \varepsilon_{31}^T & \varepsilon_{32}^T & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

Piezoelektrik yük sabiti için d_{ij} , ilk alt simge olan i, elektrik yer değiştirmesini ya da elektrik alanını belirtir. İkinci alt simge olan j, gerinim ya da gerilmeyi belirtir. g_{ij} , e_{ij} , h_{ij} ve k_{ij} gibi diğer ifadelerde de aynısını belirtir [28].

2.4.3. Simetri ve Piezoelektriklik

Bir malzemenin piezoelektriklik gösterebilmesi için, merkezi simetrik olmayan bir kristal yapıya sahip olması gerekir. Kristal yapının simetrisine bağlı olarak, çeşitli d_{ij} bileşenleri ya sıfırdır ya da karşılıklı olarak bağımlıdır, böylece piezoelektrik davranışın basitleştirilmiş bir analizi sağlanır [28].

Piezoelektrik seramikler, geniş bir piezoelektrik malzeme sınıfını oluşturur. Doğası gereği piezoelektrik davranış sergileyen kuvars gibi tek bir kristalin aksine, piezoelektrik seramikler genel olarak makroskopik ölçekte piezoelektrik davranış göstermezler. Piezoelektrik özellik gösterebilmesi için seramik malzemeye "destekleme" adı verilen bir işlemle yapay bir polarizasyon verilmelidir. Piezoelektrik kristallerin simetrisi oldukça karmaşık olabilirken, piezoelektrik seramiklerin hepsinin ortak noktası, polarizasyon işleminden sonra polarizasyon eksenine etrafında dönme simetrisi sergilemeleridir. Şekil 2.14 incelendiğinde geleneksel olarak, polarizasyon yönüne 3 yönü denir ve polarizasyon yönüne dik olan tüm yönler 1 yönü olarak kabul edilir. Boylamsal ve enlemesine piezoelektrik yük sabiti Denklem 2.27 ve 2.28'deki gibi bağıntılıdır [28].

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

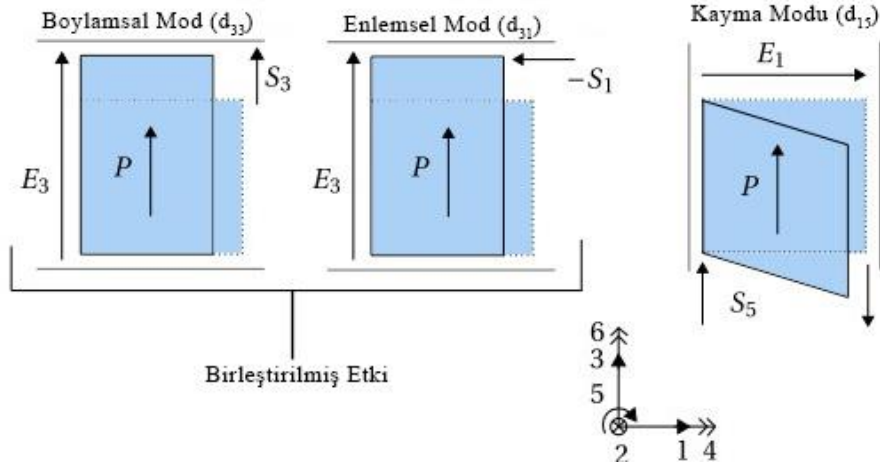
$$d_{31} = d_{32} = -\nu d_{33} \quad (2.28)$$

ν : Malzemenin Poisson oranıdır. Piezo seramiklerin Poisson oranı genellikle 0,45 dir.

2.4.4. Piezoelektrik Seramiklerin Çalışma Modları

Piezoelektrik seramikler boylamsal, enine, kayma ve hidrostatik olmak üzere dört farklı çalışma moduna sahiptir. Bu çalışma modları, mekanik ve elektrik alanı arasındaki bağlantıyı çeşitli yönlerde uygular. Boylamsal mod olan d_{33} çalışma modunda deformasyon ve elektrik alan Şekil 2.15'deki gibi üç yöndedir, yani polarizasyon yönüne paraleldir. Analizin boyuna çalışma moduyla sınırlandırılması, Denklem 2.26 ile karşılaştırıldığında, aşağıdaki iki girişli denklemi veren önemli bir basitleştirme sağlar. İlk giriş mekaniktir, S ve T değişkenleri ile üç yönde karakterize edilir. İkinci giriş ise elektriksel olup D ve E değişkenleri ile üç yönde karakterize edilir [28]. Denklem 2.29'da ifade edilmiştir.

$$\begin{pmatrix} S_3 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s_{33}^E & d_{33} \\ d_{33} & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_3 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$



Şekil 2.15 Piezoelektrik seramik bileşeni için çalışma modları [28].

Enine çalışma modu olan d_{31} modunda elektrik alan 3 yönündedir, polarizasyon yönüne paraleldir ve deformasyon 1 yönündedir, polarizasyon yönüne diktir. Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Enine çalışma modu iki girişli Denklem 2.30’dan oluşmuştur [28].

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Mekanik bağlantı noktaları S ve T 1 yönünde, elektriksel bağlantı noktaları D ve E 3 yönündedir. Boylamsal mod Denklem 2.29 ve enine mod Denklem 2.30 birbiriyle Denklem 2.31’deki gibi ilişkilidir, çünkü polarizasyon eksenini boyunca deformasyon, doğal olarak Poisson oranı aracılığıyla dikey yönde deformasyona neden olur [28].

$$d_{31} = -\nu d_{33} \quad (2.31)$$

Kayma çalışma modu olan d_{15} modunda elektrik alan 1 yönündedir, polarizasyon yönüne diktir ve deformasyon diğer dik eksen etrafındaki kayma deformasyonudur. Şekil 2.15’de gösterilmiş ve Denklem 2.32’de ifade edilmiştir [28].

$$\begin{pmatrix} S_5 \\ D_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s_{55}^E & d_{15} \\ d_{15} & \varepsilon_{11}^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_5 \\ E_1 \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Mekanik bağlantı noktası S ve T 5 yönünde, elektriksel bağlantı noktası D ve E 1 yönündedir. Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Algılama amacıyla, hidrostatik basınçtan kaynaklanan bir sinyali tespit etmek için piezoelektrik seramikler de kullanılabilir. Hidrostatik piezoelektrik yük sabiti (d_h), d_{33} işlemi ve d_{31} işlemi için piezoelektrik yük sabitlerine bağlıdır aralarındaki ilişki Denklem 2.33’de verilmiştir [28].

$$d_h = d_{33} + 2d_{31} = (1 - 2\nu)d_{33} \quad (2.33)$$

2.4.5. Piezoelektrik Sabitler

Denklem 2.34'de Bağımsız değişken olarak verilmiş olan elektrik alan (E) yerine elektrik yer değiştirmesi (D) kullanılmış ve Denklem 2.35 elde edilmiştir [28].

$$\begin{pmatrix} S \\ D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d \\ d & \varepsilon^t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T \\ E \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

$$\begin{pmatrix} S \\ E \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s^D & g \\ -g & (\varepsilon^t)^{-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T \\ D \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

g : Piezoelektrik voltaj sabiti (Vm/N), Denklem 2.36'da tanımlanmıştır.

$$g = \frac{d}{\varepsilon^t} \quad (2.36)$$

$s^D (m^2/N)$: Sabit elektrik yer değiştirmesi (D) koşulları altındaki uyumluluk (Denklem 2.37)

$$s^D = s^E - \frac{d^2}{\varepsilon^t} = s^E \left(1 - \frac{d^2}{s^E \varepsilon^t} \right) \quad (2.37)$$

Bağımsız değişken olarak gerilim (T) yerine gerilimin (S) kullanılması durumunda, Denklem 2.34 düzenlenerek Denklem 2.38 elde edilmiştir.

$$\begin{pmatrix} T \\ D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (s^E)^{-1} & -e \\ e & \varepsilon^s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S \\ E \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

e : Gerilimi elektriksel yer değiştirmeye ve elektrik alanını gerilime bağlayan piezoelektrik sabiti (N/Vm) Denklem 2.39'da gösterilmiştir.

$$e = \frac{d}{s^E} \quad (2.39)$$

$\varepsilon^s (m^2/N)$: Sabit gerilim (S) koşulları altındaki geçirgenlik, Denklem 2.40'da verilmiştir.

$$\varepsilon^s = \varepsilon^t - \frac{d^2}{s^E} = \varepsilon^t \left(1 - \frac{d^2}{s^E \varepsilon^t} \right) \quad (2.40)$$

Piezoelektrik bağlantı katsayısı k ile ifade edilmiş ve Denklem 2.41'de gösterilmiştir [28].

$$k^2 = \frac{d^2}{\varepsilon^t s^E} \quad (2.41)$$

Bir piezoelektrik malzemenin bağlantı katsayısı, mekanik enerjiye dönüştürülebilen elektrik enerjisinin bir ölçüsüdür (Denklem 2.42) ve bunun tersi de geçerlidir (Denklem 2.43).

$$k^2 = \frac{\text{elektrik enerjisine dönüşen mekanik enerji}}{\text{giren mekanik enerji}} \quad (2.42)$$

$$k^2 = \frac{\text{mekanik enerjiye dönüşen elektrik enerjisi}}{\text{giren elektrik enerji}} \quad (2.43)$$

Denklem 2.38 ve Denklem 2.41'den bağlantı katsayısı (k) için Denklem 2.44-2.47 türetilmiştir.

$$k^2 = \frac{\varepsilon^T - \varepsilon^S}{\varepsilon^T} \quad (2.44)$$

$$k^2 = \frac{s^E - s^D}{s^E} \quad (2.45)$$

$$k^2 = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon^T E^2 - \frac{1}{2}\varepsilon^S E^2}{\frac{1}{2}\varepsilon^T E^2} \quad (2.46)$$

$$k^2 = \frac{\frac{1}{2}s^E T^2 - \frac{1}{2}s^D T^2}{\frac{1}{2}s^E T^2} \quad (2.47)$$

Boylamsal çalışma modunda (d₃₃-modu) yüksek kaliteli piezoelektrik seramikler için, bağlantı katsayısının genel olarak değerleri Denklem 2.48'deki gibidir.

$$k_{33} \approx 0.7 \rightarrow k_{33}^2 \approx 0.5 \quad (2.48)$$

Kayma çalışma modu için bağlantı katsayısı aynı büyüklük değerindedir ancak enine çalışma modu bu değer sadece %20'si ile sınırlıdır çünkü Poisson oranı yoluyla piezoelektrik yük sabiti d₃₁ piezoelektrik yük sabiti d₃₃ değerinin sadece %45'idir [28].

2.4.6. Dinamik Malzeme Parametreleri

Yoğunluk (atalet) ve malzeme kayıpları (sönümlenme) söz konusu olduğunda piezoelektrik bileşenlerin dinamik çalışması için önemlidir. Bir piezoelektrik bileşene alternatif bir elektrik alanı uygulandığında elastik dalgalar oluşur. Mekanik rezonansın meydana geldiği frekans, belirli bir çalışma modunda malzemenin dalga hızına (v) bağlı olarak bileşenin geometrisi tarafından belirlenir, Denklem 2.49'da gösterilmiştir [28].

$$v = \frac{1}{\sqrt{s^e \rho}} \quad (2.49)$$

ρ : Malzemenin yoğunluğu (kg/m³)

Piezoelektrik malzemeler, ses hızından ziyade, belirli bir geometrinin bileşenlerinin çeşitli çalışma modlarının temel rezonans frekansının hesaplanmasını sağlamak için frekans sabiti N (Hz m) kullanılır. Düzlemsel titreşim modu dışında, frekans sabitinin piezoelektrik malzemedeki ses hızının yarısına eşit olduğu Denklem 2.50'deki gibi gösterilebilir [28].

$$N_i^* = \frac{v_i^*}{2} \quad (2.50)$$

Denklem 2.50'de 'i' simgesi dikkate alınan belirli titreşim modunu ve '*' simgesi elektrik sınır koşulunu belirtir.

Bir elektrik devresindeki kalite faktörüne benzer şekilde, mekanik kalite faktörü Q_m , titreşen malzemedeki gerilim ile faz dışı gerilimi ve gerilim ile faz içindeki gerilimi ilişkilendirir. Ek olarak mekanik kalite faktörü Q_m rezonanstaki bir piezoelektrik bileşenin rezonans tepe noktalarının netliğini tanımlar. Mekanik kalite faktörünün tersi, mekanik kayıp tanjantına eşittir, Denklem 2.51'de verilmiştir [28].

$$Q_m^{-1} = \tan \delta_m = \frac{(s^E)''}{(s^E)'} \quad (2.51)$$

Bir piezoelektrik malzeme içinde yayılan ve farklı ortamlarla etkileşime giren akustik dalgaların analizi için bir malzemenin akustik empedansı (Z) önemli bir parametredir. Akustik empedans, elastisite modülüne (c) ve malzemenin yoğunluğuna (ρ), Denklem 2.52'deki gibi bağlıdır [28].

$$Z = \sqrt{\rho c} \quad (2.52)$$

Elektrik empedansına benzer şekilde, iki ortam aynı akustik empedansa sahip olduğunda akustik enerjinin bir ortamdan diğerine aktarımı maksimumdur. Empedans farkı ne kadar büyük olursa, akustik dalga'nın yansıyan kısmı o kadar büyük ve arayüz boyunca iletilen kısım o kadar küçük olur [28].

3. ENERJİ KAZANIMI

Elektrik enerjisinin üretimi, mekanik, kimyasal, güneş, radyo frekansı ve termal gibi enerji çeşitlerinden elektrik enerjisine dönüşüm sürecidir. Mekanik enerji dönüşümü, şehirlerin enerji ihtiyacını büyük ölçüden karşılayan hidroelektrik ve rüzgâr türbinlerinde kullanılır. Pillerde taşınabilir elektrik enerjisini sağlamak için kimyasal enerji dönüşümü kullanılır. Termal enerji dönüşümü de önemli bir yenilenebilir enerji çeşididir. Güneş enerjisi dönüşümü, elektrik enerjisi üretmek için güneş enerjisini kullanır. Tarlalara kurulan güneş enerji santralleri, tarımsal uygulamalar ve farikalarda yaygın olarak kullanılır. Büyük bir endüstriyel ölçekte elektrik üretimi sağlar. Radyo frekansı enerji dönüşümü, elektromanyetik spektrumun milimetreden mikron dalga boyuna kadar olan aralığındaki elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür [29].

Enerji kazanımı, mekanik, kimyasal, güneş, radyo frekansı ve termal enerji dönüşümü ilkelerinden birini kullanarak küçük miktarlarda elektrik enerjisi üretimidir. Elektrik enerjisi kazanımında için belirtilen enerji dönüşüm süreçleri arasından, çok düşük ışık seviyelerinde bile güneş enerjisi dönüşümünün genellikle en iyi seçim olduğu görülmüştür ve diğer birçok üründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak; kol saatlerine, hesap makinelerine, yol işaretlerine ve güneş ışığının mevcut olduğu ve alan ve güç gereksinimlerinin karşılanabileceği diğer tüm uygulamalara güç sağlamak için kullanılır. Güneş enerji tabanlı enerji hasat makinelerinin enerji çıkışı, güneş pilinin boyutu ile sınırlıdır. Bununla birlikte, birçok enerji hasadı uygulamasında, birkaç mikrowatt güç yeterli olabilir ve elde edilebilir. 7 gün 24 saat çalışması için şarj edilebilir piller ve süper kapasitörler gibi depolama cihazları kullanılmıştır. Ancak yeterli ışığın asla bulunmadığı kapalı ortamlarda olduğu gibi birçok uygulamada güneş enerjisi dönüşümünün kullanımının pratik olmadığını belirtmek önemlidir. Güneş enerjisi dönüşümünün kullanılması, güneş kollektörünün enerjiyi toplayıp depolayan bileşenlerinin gerekli boyutu nedeniyle pratik olmayabilir. Bu tür durumlara endüstriyel tesislerde titreşimi ve yapı sağlığı izlemek için makinelerde kullanılan kendi kendine çalışan kablosuz ağ bağlantılı sensörler, araç lastikleri veya bir makine gövdesi gibi kapalı bir alanda kullanılan sensörler ve çeşitli tipleri içeren mikro elektromekanik sistemler örnek olarak verilebilir [29].

Sonuç olarak, birçok uygulamada kinetik ve potansiyel enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmeye dayalı enerji kazanımı sağlayan enerji üreteçleri en önemli seçenek haline gelir. Piezoelektrik dönüştürücüler kullanan mekanik enerji tabanlı enerji üretim cihazları, bir acil durum nedeniyle üretilen ivmeyi veya kuvveti algılamak ve ölçmek için sensörler olarak kullanılma konusunda önemli bir yeteneğe sahiptir. Enerji kazanım makinelerinin tasarımı, özellikle harekete dayalı enerji kazanım sistemleri için hem sistem enerji kaynağı hem de arayüz mekanizması tarafından belirlenir. Enerji üreteçleri için mevcut enerji kaynakları, ortam veya yapay olarak gruplandırılabilir. Güneş radyasyonu, termal gradyanlar, rüzgâr ve okyanus dalgaları gibi doğal

kaynaklardır. Yapay kaynaklar, çeşitli faaliyet ve süreçlerin yan ürünleri olarak ortaya çıkabilir. Telekomünikasyon sistemlerinde kullanılmak üzere üretilen radyo frekansı sinyallerinden gelen arka plan enerjisi veya üretim makineleri gibi büyük endüstriyel sistemlerden kaynaklanan titreşim enerjisi yapay kaynaklara örnektir. Belirli bir enerji kaynağının seçimi, çalışma ortamı, mevcut enerji yoğunluğu ve cihazların çalışabilmesi için gerekli enerji seviyesi gibi çeşitli parametrelere bağlıdır [29].

Enerji, her ölçekte çok çeşitli kaynaklardan kazanılabilir. Güneş ve rüzgâr yoluyla büyük miktarlarda enerji toplanılabilir ancak kablosuz sensör sistemleri için düşük miktarlarda güce ihtiyaç vardır. Bu nedenle, kablosuz sensörlerin ihtiyaç duyduğu az miktarda faydalı elektrik enerjisinin üretilebilmesi için radyo dalgaları ve mekanik titreşimler gibi daha az enerji elde edilebilen kaynaklar da düşünülebilir.

3.1. Güneş Enerjisi Tabanlı Elektrik Enerjisi Kazanımı

Güneş ışığını büyük ölçekte elektrik enerjisine dönüştürmenin iki iyi bilinen yolu vardır. İlk olarak güneşten termal olarak faydalanmaktır. Güneşten gelen radyasyonu kollektörde yoğunlaştırarak jeneratörü çalıştırmak için kullanılan çalışma sıvısını ısıtır. Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmenin diğer yolu ise fotonun enerjisini değerlendirmektir. Fotonun enerjisi, yarı iletken malzemede bir elektronun enerji durumunu, valans elektron bandından akım akışına izin veren iletim bandına yükseltmek için kullanılabilir. Yarı iletken malzemelerde akım akışını sağlayan fotonlardan gelen enerji, fotovoltaiik hücrelerin çalışma prensibidir. Güneş enerjisi üretimi, geniş bir güneş radyasyonu alanına odaklanması gerektiğinden, küçük miktarlardaki enerji kazanımı için pek uygun değildir ama fotovoltaiik hücreler, küçük aydınlatmalarda, hesap makinelerinin enerji ihtiyacında ve bazı kablosuz sensörlerde kullanılmıştır. Enerji ihtiyacı karşılanacak olan cihaz, doğrudan güneş radyasyonuna maruz kalmayabilir ve boyut, ağırlık sorunları nedeniyle bir depolama cihazı kullanılmadan gündüz ve gece boyunca kesintisiz güç gerektirebilir bu tür durumlardan dolayı tercih sebebi değildir [30].

3.2. Termal Enerji Tabanlı Elektrik Enerjisi Kazanımı

Atık ısı kaynaklarından kaynaklanan sıcaklık farklılıklarından da nispeten küçük miktarlarda enerji elde etmek için yararlanılabilir. Bir peltier elemanı ile birlikte bir malzeme arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle bir voltajın ortaya çıkmasına neden olan termoelektrik etki, bir sıcaklık farkını doğrudan elektriğe dönüştürmek için kullanılabilir. Performans ve elektrik çıkışı, bir termoelektrik cihazda korunabilen sıcaklık farkıyla orantılıdır. Termoelektrik jeneratör tasarımlarının performansı umut verici olsa da, pratik tasarımların uygulanabilmesi için 5–10 °C

sıcaklık farkları gereklidir. Bu sıcaklık farkı da kablosuz sensör sistemleri gibi uygulamalar için uygun değildir [30].

3.3. Radyo Frekans Enerjisinden Elektrik Enerjisi Kazanımı

Radyo frekans enerjisi teknolojisi, megahertzden mikrodalgaya kadar radyo frekansı bandında bulunan elektromanyetik enerjileri toplar. Radyo frekans enerjisi cihazları genel olarak alınan Radyo frekans enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için ayarlanmış bir alıcı antene sahiptir. Alıcı kaynağa yakın olmadığı ve alıcı çok büyük olmadığı sürece, radyo frekans enerji kazanım makineleri tarafından üretilen güç son derece düşüktür. Bu enerji kazanım cihazlarından bazıları, yakındaki kaynaklardan yayılan ortam elektromanyetik enerjisini kullanır ve yalnız başına çalışan sensörlerde kullanılabilir. Ancak bu tip üreteçler iletken sistemlerin içine yerleştirilemez. Yönlendirilmiş radyo frekansı emisyonları, eşleşen alıcı antenler tarafından toplama için de kullanılmıştır. Aktif ve pasif radyo frekansı tanımlama sistemleri bu tür teknolojileri kullanır [29].

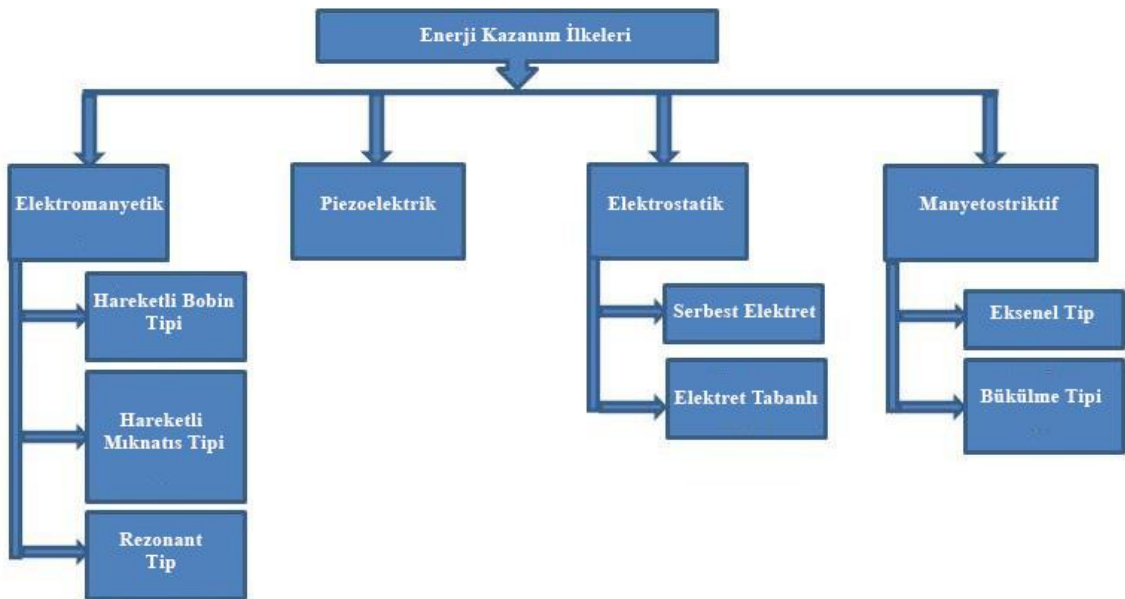
3.4. Titreşimden Enerji Kazanımı

Kablosuz sensör ağları, mikroeletromekanik sistemler ve eşyaların interneti gibi teknolojilerdeki gelişmeler nedeniyle, mobil enerji kaynaklarının kullanımı oldukça önemlidir. Pil bağlantısı, kablo bağlantısı, yenilenmeyen enerji kaynakları vb. bu ihtiyaçların sorununu çözebilir. Ancak bazı teknik kusurlar, pildeki akım kaçakları, elektrik direnci ve kablo üzerinden bağlantı yapılması durumundaki pratik zorluklar vb. nedenlerle, diğer verimli enerji depolama metotlarının oluşturulmasına artan bir ihtiyaç vardır. Mevcut bir enerji kaynağının kullanımına yönelik engellere; enerji kaynağının belli bir miktarda bulunması, düzenli aralıklarla bakım yapılması, işgücü kısıtlamaları ve ilgili malzemelerin atılmasındaki gecikme gibi örnekler verilebilir. Tüm bu engellerin üstesinden gelmek için, mevcut teknolojik ihtiyaçları çevreyi kirletmeden tamamlamak ve mevcut çevresel kaynaklardan enerji üretimi olabilecek yenilikçi bir fikir üretilmiştir. Çevrenin temizliğini bozmadan ve çevreye zarar vermeden enerji toplamak için çevrede farklı seçenekler mevcuttur. Bu nedenle, çevresel kaygılar ve küresel enerji krizi ile birlikte, rüzgâr, güneş, jeotermal, hidroelektrik ve titreşim gibi çeşitli enerji kaynaklarının güç ürettiği düşünülebilir. Teknolojik fizibilite, çevresel temizlik ve bakım maliyeti gibi farklı olumlu faktörleri göz önünde bulundurarak, hem güneş hem de titreşim enerji kaynakları en güzel örneklerdir. Ancak teknolojinin gelişimini gözlemlersek gelecekteki araştırma çalışmaları için titreşim enerji kaynağı en iyisidir. Titreşim enerji kaynakları küçük ölçekli cihazlara enerji sağlamada en iyi enerji kaynağıdır [31].

Titreşim enerjisi kazanma, çevredeki istenmeyen titreşim oluşumlarından enerjiyi toplama tekniğidir. Sanayilerde, binalarda, köprüler üzerindeki araçların hareketi ve çeşitli tipteki

makinelerin çalışması nedeniyle büyük miktarda titreşim meydana gelir. Çevreye boşaltılan bu artık enerjiler, boşa harcanmış bir potansiyel enerji kaynağı olarak kabul edilebilir. Akıllı malzemeler kullanılarak ve farklı enerji kazanım teknikleri benimsenerek, elektrik enerjisi kazanımı gerçekleştirilebilir. Doğaya ve sanayiye ait çevreden yararlanıldığı için serbest enerji olarak kabul edilir. Dolayısıyla titreşim, küçük ölçekli cihazları güçlendirmek için ihtiyaç haline gelmiş cazip bir enerji kaynağıdır. Katı maddeler üzerinde ilerleyen bir dalganın toplanması da söylenebilir. Mekanik enerjii elektrik enerjisine dönüştürmek için, titreşim hareketinin sismik kütlelerin ataletini kullanarak bir üreteç ile bağlanması gerekir. Bu amaçla farklı dönüştürme mekanizmaları tasarlanmıştır [31].

Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi vb. kaynakları kullanan yenilenebilir enerji üretim tesisleri kW - MW aralığında güç üretebilir ve makro enerji kazanım sistemleri olarak adlandırılır. Titreşime dayalı mikro enerji kazanım sistemleri ise mW - μ W aralığında güç üretir. Kablosuz cihazların enerji ihtiyacını karşılamak önemli bir problemdir. Titreşimlerden enerji kazanımı, şebekeden uzak ve kablosuz cihazlar için uzun vadeli bir çözüm sunmaktadır. Birçok araştırma çevre dostu, düşük kurulum ve bakım maliyeti ile uygulanabilir olduğu için titreşim enerjisi üretimine odaklanmaktadır. Titreşim enerji üreteçlerinden üretilen enerji, düşük güçlü giyilebilir sensör, elektrokardiyogram makinesi, elektronik mikroskop, serum analizörü, glukometre, koşu bandı, manyetik rezonans görüntüleme makinesi ve otoanalizör gibi sağlık izleme cihazlarının işleyişinde kullanılabilir. Elektrik üretim kapasitesini geliştirmek için, farklı çalışmalarda çeşitli stratejiler rapor edilmiş ve gözden geçirilmiştir. Titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için bazı ortak ilkeler Şekil 3.1'de verilmiştir [31].



Şekil 3.1. Enerji kazanım ilkeleri [31].

3.4.1. Elektromanyetik Enerji Üreteçleri

Elektromanyetik enerji üreteçlerinde mekanik enerji, iletken bobin ve manyetize edilmiş bir gövde arasında bağıl hareketin meydana gelmesi sırasında elektrik enerjisine dönüştürülür. Güç üretimi için konfigürasyonda uygulanan manyetik devre, bir manyetik alan gerektirir. Manyetik alan, sabit bir mıknatıs veya bir elektromıknatıs tarafından üretilir. Sabit mıknatıs, güç girişi gerektirmedikinden düşük güçlü cihazlar için elektromıknatıstan daha uygundur. Sabit mıknatıslar, ferromanyetik veya ferrimanyetik malzeme içerir. Ferromanyetik bir malzemede eşleşmemiş elektronlar içeren atomlar nedeniyle, net bir manyetik moment üretirken, ferrimanyetik malzeme zıt manyetik momentlerin atomunu içerir. Ferromanyetik malzemeler güçlü bir elektrik alanı oluştursalar da, daha yüksek elektrik direncine sahip oldukları ve daha az eddy akımı etkisine neden oldukları için yaygın olarak kullanılırlar. Genel olarak, kullanılan dört tip mıknatıs mevcuttur; seramik, neodimyum demir bor, alnico ve samaryum kobalt. Titreşimden enerji kazanım çalışmaları, manyetik alan kuvveti, zorlayıcı kuvvet ve akı yoğunluğu gibi özelliklere bağlıdır. Malzemelerin optimum manyetik özellikleri elde etmesi için yüksek sıcaklıkta tavlama işlemi gereklidir [31].

3.4.2. Piezoelektrik Enerji Üreteçleri (PEÜ)

Piezoelektrik enerji üreteçleri, genellikle yapıların deformasyonu meydana gelirken mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Piezoelektrik etki, iki türe ayrılan benzersiz bir malzeme özelliğidir. Bunlardan biri, mekanik gerilme veya gerinme hissinin malzeme boyunca bir elektrik alanı oluşturduğu ve bir sensör gibi davrandığı doğrudan etkidir. Diğeri ise ters etkidir, tersine uygulanan elektrik alan malzemede deformasyona neden olur. Böyle bir etki hem doğal hem de insan yapımı malzemelerde bulunur. Piezoelektrik malzemenin her kristali, daha büyük iki değerli metal iyonları ve O₂ örgüsünün içine yerleştirilmiş küçük, dört değerlikte bir metal iyonundan oluşur. Bu malzemelerin bazı bilindik örnekleri berilit, kuvars, kurşun zirkonat titanat (PZT) ve alüminyum nitrürdür. Daha çevre dostu hale getirmek için yeni kurşunsuz piezoelektrik geliştirildi örnek olarak çinko nanoteller (ZnO) içeren piezoelektrik enerji nanojeneratörler verilebilir [31].

Çoğunlukla tüm piezoelektrik malzemeler doğada kırılındır. Piezoelektrik malzemeler; tek kristaller, seramikler, ince filmliler, polimerler ve kompozitler olarak beş ayrı sınıfta incelenir. Piezoseramik malzemeler hem düşük hem de yüksek güç uygulamaları için kullanılabilir. Örneğin, düşük güç için PZT-5A, PZT-5H ve PZT-5J ve yüksek güç uygulaması için PZT-4 ve PZT-8 kullanılır. Gözenekli PZT malzemesi, iyi kapasitans ve sertlik kontrolü gibi avantajlar sağlamıştır. Piezoelektrik seramikler gibi piezoelektrik polimerler de yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Ancak poliviniliden florür gibi polimerin bağlanma katsayıları düşüktür ve malzemeye zayıf bir şekilde yapışırlar, PZT ise yüksek bir bağlanma katsayısına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı enerji kazanımı

için PZT tercih edilir. Tek kristalli piezoelektrik malzemelerin elektromekanik bağlantı faktörü 0,95 ve piezoelektrik katsayıları 1500 pC/N ila 2500 pC/N arasındadır. Bu gibi özellikleriyle benzersizlerdir. Piezoelektrik sabiti değerlerinin daha yüksek olması nedeniyle Piezoelektrik ince filmler genellikle sensörler ve aktüatörler olarak kullanılırken, PZT kalın filmler MEMS üretmek için yaygın olarak geliştirilmiştir. Malzeme seçimi için geniş bir seçenek alanı olmasına rağmen, piezoelektrik voltaj sabiti ve gerinim sabitinin ürün değeri dikkate alınarak PEÜ'ler için uygun bir malzeme seçilir [31].

3.4.3. Elektrostatik Enerji Üreteçleri

Elektrostatik ayrıca triboelektrik olarak da bilinir ve elektrostatik yük aktarımı triboelektriklik olarak adlandırılır. Yüklü bir kapasitörün iki yüzeyi arasında hareketle enerji üretir ve bu da kapasitör potansiyel farkının değişmesine neden olur ve statik elektrik üretilir. Elektrostatik enerji üreteçleri, temelde iki aşamalı bir dönüşüm olan, yani elektriksel etki ve mekanik etki olan çeşitli dönüştürücüler kullanarak titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Elektrostatik enerji üreteçlerinin performansı sadece konfigürasyona değil, aynı zamanda malzemelerin doğasına da bağlıdır. Çevredeki malzemelerin çoğu triboelektrifikasyon etkisine sahip olduğundan, malzeme miktarı ve seçim alanı çok büyüktür. Temel olarak triboelektrik malzemeler, triboelektrik seri olarak bilinen elektronları kaybetme veya kazanma yönündeki davranışlarına göre düzenlenir. Bu seride malzemeler, pozitif yüklü elektronları kaybetme ve negatif yüklü elektronları kazanma eğilimleri aracılığıyla yerleştirilir. Ancak, bu listelenen malzemeler arasındaki bazı malzemeler her iki yöne de zayıf bir eğilim göstermektedir. Elektrostatik enerji üreteçlerinin güç çıkışını arttırmak ve yük transfer miktarını bilmek için serinin farklı pozisyonlarından farklı tipte polimer malzemeler seçilerek araştırmalar devam etmektedir [31].

3.4.4. Manyetostriktif Enerji Üreteçleri

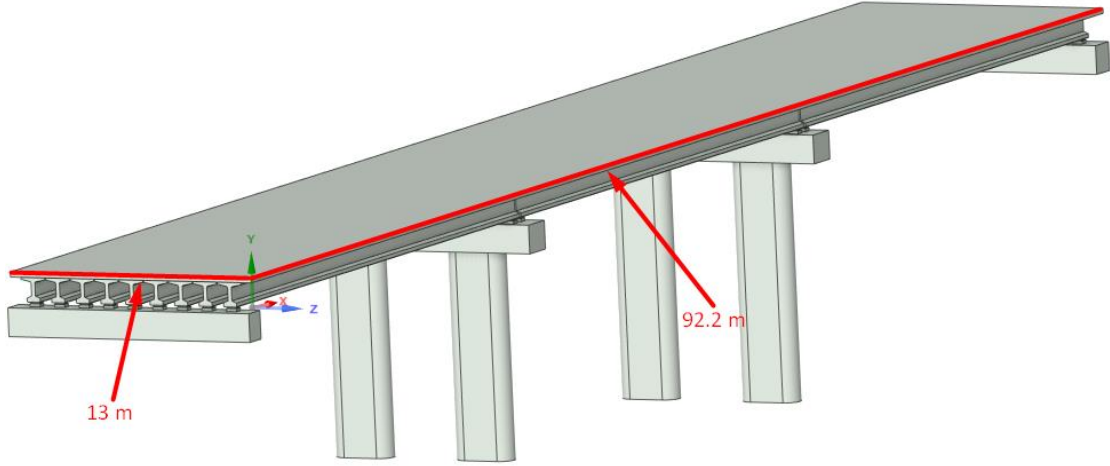
Manyetostriktif malzeme, manyetik enerjiden kinetik enerji üretme özelliğine sahiptir. Manyetostriktif etki kullanan enerji üreteçleri, iki adımda mekanik titreşimden elektrik enerjisi üretir. Önce mekanik enerji manyeto-mekanik kuplaj ile manyetik enerjiye dönüştürülür ve daha sonra elektromanyetik kuplaj kullanılarak bu manyetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Manyetostriktif malzemeler, demir, kobalt, nikel gibi küçük ferromanyetik malzemeler içerir. Bu malzemelerin küçük bir manyetik momenti vardır. Manyetik alan uygulanırken, eksenel bir manyetik moment, bir atomik manyetik moment ile üst üste bindirilir. Bu yöntem sayesinde malzeme ya büzülür ya da esner. Polimer bazlı kompozitler de manyetostriktif malzeme olarak kullanılır. Bu malzeme manyetik alanla temas ettiğinde, manyetik alanın teması söz konusu

olduğunda boyutu, elastik ve manyetik özellikleri aynı anda değişir. Enerji üretçlerinin gücünü arttırmak için manyetostriktif malzemeler, güçlü bir manyetik alan ile enine tavlabilir. Polimer kompozitler, yüksek dirençleri, düşük ağırlıkları, geliştirilmiş mekanik özellikleri ve iyi frekans tepkisi nedeniyle enerji üretçlerinde manyetostriktif malzemelerden daha iyidir. Manyetostriktif polimer kompozitler ultrasonik dalgayı algılamak için, aktüatörlerde, biyomedikal uygulamalarda, sensörlerde, titreşim izolasyonu ve kontrolünde ve sağlık takibi gibi benzeri alanlarda kullanılır [31].



4. METARYAL VE METOT

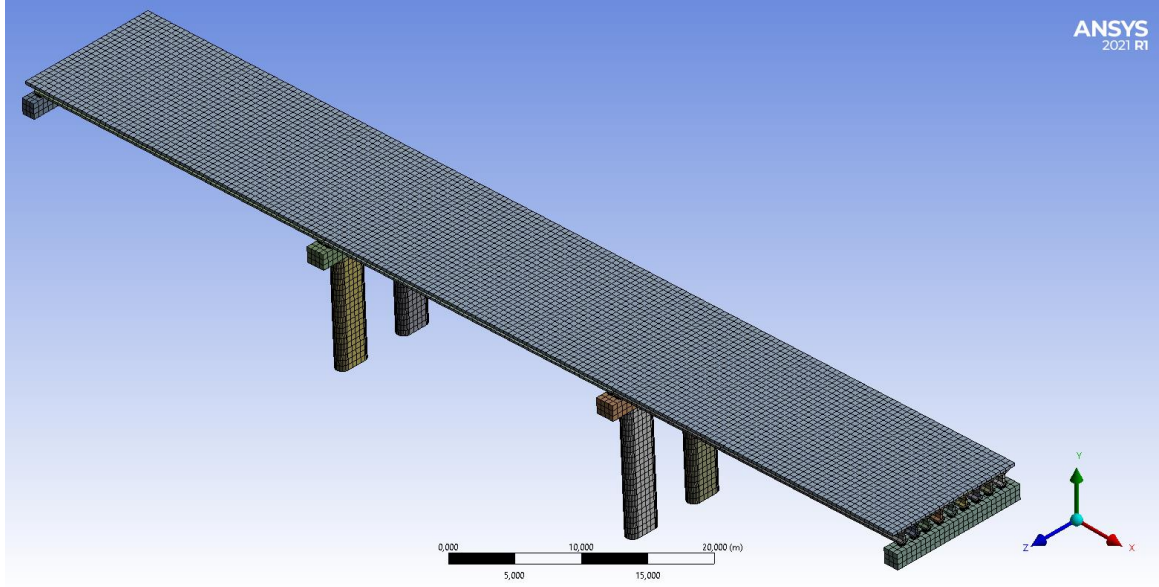
Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı ile Elazığ'da bulunan Kuşsarayı-2 Köprüsü gerçek ölçüleriyle Şekil 4.1'deki gibi modellenmiştir. Köprüdeki kirişler ve destek elemanlarına C45/55 tipi beton diğer bölgelere ise C30/37 tipi beton özellikleri tanımlanmıştır. Beton tiplerinin malzeme özellikleri Tablo 4.1'de belirtilmiştir. Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Sonlu elemanlarına ayırma yöntemi olarak Sweep Ağ Metodu kullanıldı ayrıca PEÜ'lerin üzerinde bölgesel ağ çalışması yapılmıştır. Sonlu elemanlarına ayırma işlemi sonucunda geometride 277250 düğüm noktası ve 44362 eleman oluşturulmuştur. Köprünün sonlu elemanlarına ayrılmış görüntüsü Şekil 4.2 ve 4.3'de gösterilmiştir. Köprünün doğal frekanslarının ve çalışma frekans aralığının bulunması için modal analiz, köprünün maksimum deforme olan noktalarının bulunması için harmonik analiz ve optimal konumlara yerleştirilen PEÜ'lerden enerji elde edebilmek için piezoelektrik analiz gerçekleştirilmiştir.



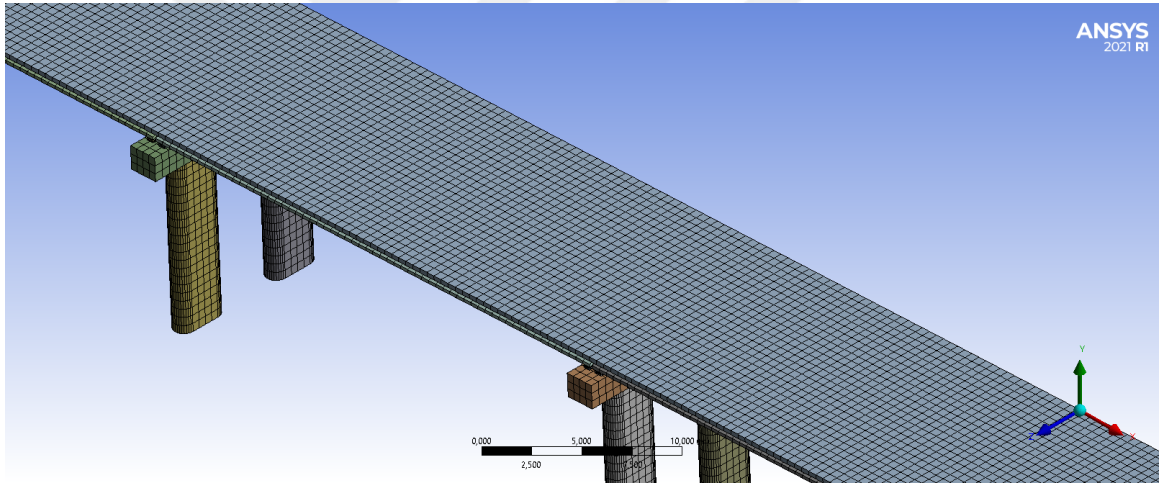
Şekil 4.1. Kuşsarayı-2 Köprüsü'nün ANSYS programında modellenmiş görüntüsü.

Tablo 4.1. Beton özellikleri [32].

Özellikler	Birim	C30/37 Beton	C45/55 Beton
Yoğunluk	kg/m ³	2500	2500
Elastite Modül	GPa	32.8	36.28
Poisson Oranı	-	0.2	0.2



Şekil 4.2. Köprünün sonlu elemanlarına ayrılmış görüntüsü.



Şekil 4.3. Köprünün sonlu elemanlarına ayrılmış görüntüsü.

4.1. Modal Analiz

Yapıların tasarlanırken titreşim özelliklerini belirlemede kullanılan analiz tipidir, doğal frekans analizi olarak da bilinir. Tüm yapıların doğal frekansları vardır, bu doğal frekanslar yapının genellikle en önemli özellikleridir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve mod katılım faktörlerinin hesaplanmasını amaçlayan modal analiz en temel dinamik analiz türüdür. Yapıların tasarımında rezonans titreşimlerinden kaçınılmasına veya belirli frekanslarda titreşmesini sağlar. Tasarımın farklı dinamik yüklere nasıl tepki vereceği hakkında fikir verir ve diğer dinamik analizler için çözüm kontrollerinin hesaplanmasına yardımcı olur. Yapıların titreşim özellikleri, farklı dinamik yüklere nasıl tepki vereceğini belirlediğinden diğer dinamik analizler gerçekleştirilmeden önce modal analiz yapılır [33].

Modal analiz, uzay yapıları, havacılık mühendisliği, biyomedikal cihazlar, akustik aletler, ulaşım araçları, nükleer santraller, inşaat yapıları gibi sayısız alanda yapıların dinamik özelliklerini belirleme ve iyileştirme de önemli bir teknoloji haline gelmiştir. Serbest titreşim, bir sistem, başlangıçtaki sapma nedeniyle ve dışarıdan uygulanan kuvvetlerin yokluğunda, sistemin kendisinde bulunan kuvvetlerin etkisi altında salındığında gerçekleşir. Sistemin dinamik özellikleri olan rijitlik ve kütle dağılımından kaynaklı bir veya daha fazla doğal frekansta sistem titreyecektir. Sistemin sürekli olması durumunda, özellikleri uzaysal koordinatların fonksiyonlarıdır. Sistem sonsuz sayıda serbestlik derecesine ve sonsuz sayıda doğal frekansa sahiptir. Modal analiz yöntemi, karmaşık yapıların dinamik özellikleri ve problemlerinin belirlenip çözülmesinde önemli rol oynamaktadır [34].

Modal Analiz lineer bir dinamik analizdir. Bir yapının dinamik tepkisini çözebilmek için sonlu elemanlar analizinde kullanılan, ivme, hız ve yer değiştirmenin olduğu hareket denklemi Denklem 4.1'deki gibidir [35].

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (4.1)$$

$[M]$ Kütle matrisi, $[C]$ sönümleme matrisi, $[K]$ rijitlik matrisidir. Üç matris de doğrusal dinamikte sabittir. $\{\ddot{u}\}$ İvme Vektörü, $\{\dot{u}\}$ hız vektörü, $\{u\}$ yer değiştirme vektörü, $\{F\}$ yük vektörüdür. Bu vektörler zamanın bir fonksiyonu olarak değişir.

Çoğu yapıdaki sönümleme oranı %10 dan çok daha düşüktür bu da sistemdeki titreşimlerin yavaş sönümlenmesi anlamına gelir bu yüzden modal analiz çözümünde Denklem 4.2'deki gibi sönümlemeyi dahil etmemize gerek yoktur.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (4.2)$$

$\{\ddot{u}\}_1$ ve $\{u\}_1$ vektörlerinin çözüm vektörleri olduğunu Denklem 4.3'deki gibi varsayarsak

$$[M]\{\ddot{u}\}_1 + [K]\{u\}_1 = \{F\} \quad (4.3)$$

denklemi elde edilir. Yük vektörünü sıfır kabul ettiğimizde sonuç vektörlerinin $\{\ddot{u}\}_2$ ve $\{u\}_2$ olduğunu Denklem 4.4'deki gibi düşünersek

$$[M]\{\ddot{u}\}_2 + [K]\{u\}_2 = 0 \quad (4.4)$$

Ardından iki denklemi toplarsak Denklem 4.5 elde edilir.

$$[M]\{\ddot{u}\}_1 + [M]\{\ddot{u}\}_2 + [K]\{u\}_1 + [K]\{u\}_2 = \{F\} + \{0\} \quad (4.5)$$

denklemi elde edilir ve Denklem 4.6'daki gibi yeniden yazılabilir..

$$[M](\{\ddot{u}\}_1 + \{\ddot{u}\}_2) + [K](\{u\}_1 + \{u\}_2) = \{F\} \quad (4.6)$$

Başka bir deyişle, $(\{\ddot{u}\}_1 + \{\ddot{u}\}_2)$ ve $(\{u\}_1 + \{u\}_2)$ sönümsüz denklemin bir çözümüdür. $\{\ddot{u}\}_2$ ve $\{u\}_2$ sonuç vektörleri sıfır olduğu sürece problem yoktur. Buna değersiz

çözüm denir. Öte yandan, $\{\ddot{u}\}_2$ ve $\{u\}_2$ sonuç vektörlerinin sıfırdan farklı bir çözümü varsa dinamik denklemin birden çok olası çözümü vardır. Bu çözümlerden yalnızca biri doğrudur, başlangıç koşulları kullanılarak hangi çözümün doğru olduğu bulunur.

Denklem 4.7 çözümlenirse;

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (4.7)$$

Denklem 4.8 ve Denklem 4.9 elde edilir..

$$\{u\}(t) = \{U\}e^{i\omega t} \quad (4.8)$$

$$\{\ddot{u}\}(t) = -\omega^2\{U\}e^{i\omega t} \quad (4.9)$$

burada $\{U\}$ sabit bir vektördür ve $e^{i\omega t}$ bir sinüs dalgasının zaman tepkisini gösterir. ω sinüs dalgasının radyal frekansdır. $\{\ddot{u}\}(t)$ ise $\{u\}(t)$ vektörünün iki kez türevinden elde edilmiştir. Bu bilgiler kullanılarak Denklem 4.10 elde edilir.

$$-\omega^2[M]\{U\}e^{i\omega t} + [K]\{U\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (4.10)$$

Denklem, $e^{i\omega t}$ ile bölünerek özdeğer eşitliği Denklem 4.11'de elde edilir.

$$([K] - \omega^2[M])\{U\} = \{0\} \quad (4.11)$$

ω^2 özdeğer, $\{U\}$ ise özvektördür.

Kuşsarayı-2 köprüsünün dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için Modal Analiz uygulaması, ANSYS Workbench 2021 programında köprünün gerçek boyutları ve malzeme özellikleri kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturuldu ardından köprü ayaklarının ve köprünün başlangıç ile bitiş noktalarının altına sabit mesnet sınır şartları tanımlanarak analiz gerçekleştirilmiştir.

4.2. Harmonik Analiz

Frekans cevap analizi olarak da bilinen harmonik analiz, lineer dinamiğin önemli bir dalıdır. Lineer dinamik, hareket denklemlerini, zaman alanı problemi yerine frekans alanı problemi olarak çözer. Yapıların çoğunda sinüzoidal yükler vardır. Örneğin; köprüdeki araç yükünden oluşan trafik akışı köprü üzerinde sinüzoidal yük oluşturur ve köprü yükü tepki olarak titreşmeye zorlanır. Bu yüzden köprüler tasarlanırken bu titreşimler dikkate alınır ve yapının sağlığını etkilememesi için harmonik analiz yapılır. Harmonik Analiz, sonlu elemanlar metodunda, belirli bir frekansta uygulanan sinüzoidal yükler nedeniyle yapının kararlı durum tepkisini hesaplamak için kullanılır. Araçların köprüye uygulamış olduğu sinüzoidal yük, köprünün mod şeklinin doğal frekanslarıyla eşleşen frekansta sinüzoidal olarak tekrar ederse köprünün titreşimi maksimuma çıkar ve köprüde

ciddi çöküntülere yol açabilir. Bu davranışa rezonans denir. Araç yükünün yanı sıra kuvvetli rüzgar yükü de bir köprü yapısının titreşim kaynaklarından biri olabilir. Tacoma köprüsü, rüzgar yükü sebebiyle rezonansa girmiş ve yıkılmıştır. Harmonik analizin ana hedeflerinden biri Rezonanstan kaçınmaktır, kısmi ya da toplu rezonansta yapı yıkılabilir. Bu yüzden dinamik yüklere maruz kalan çoğu mühendislik yapısı titreşim testine tabii tutulur. Harmonik analiz, rezonanstan kaçınmanın yanı sıra titreşimin büyüklüğünü belirlemek için de kullanılır. Ayrıca harmonik analiz sonuçları, bir mühendisin farklı model tasarımlarının önemini etkin bir şekilde anlamasını sağlar [36].

Modal bir analiz, yük uygulanmaması durumunda doğal frekansları ve mod şekillerini hesaplar ve bir yapının tepkisini dikkate almaz. Öte yandan, harmonik analiz, harmonik yükler altında bir yapının tepkisini hesaplar. Bu, Modal analiz ile harmonik analiz arasındaki çok önemli bir ayrımdır [37].

Sistem kararlı durumdayken sinüzoidal girişe veya uyarıma uğrarsa çıkış da değişen genlik ve faz açısıyla sinüzoidaldir, bu harmonik analizin önemli bir özelliğidir. Harmonik fonksiyon (Denklem 4.12), frekans (Denklem 4.13 ve 4.14), genlik ve faz açısı olmak üzere üç ana değişkenden oluşur [38].

$$F = F_i \sin(\Omega_i t + \theta_i) \quad (4.12)$$

$$\Omega = 2\pi f \quad (4.13)$$

$$f = \frac{1}{T_f} \quad (4.14)$$

Bu denklemlerde kullanılan kısaltmalar

Ω : Uygulanan dairesel frekans (rad/saniye)

f : Uygulanan frekans (devir/saniye)

T_f : Periyot

F_i : Genlik

θ_i : Faz açısı

t : Zaman

şeklinde açıklanabilir. Hız Denklem 4.15'de, ivme ise Denklem 4.16'da ifade edilmiştir.

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = \text{Hız} \quad (4.15)$$

$$\ddot{u} = \frac{d\dot{u}}{dt} = \text{İvme} \quad (4.16)$$

Sinüzoidal olarak kompleks yapıda yer değiştirme formu Denklem 4.17'deki gibidir.

$$u = Ae^{i\Omega t} \quad (4.17)$$

Hız ve ivme de bu forma göre düzenlenirse, Denklem 4.18 ve 4.19 elde edilir.

$$\dot{u} = i\Omega A e^{i\Omega t} \quad (4.18)$$

$$\ddot{u} = -\Omega^2 A e^{i\Omega t} \quad (4.19)$$

Bu denklemleri trigonometrik formda yazarsak, Denklem 4.20-4.22 elde edilir.

$$u = A(\cos\Omega t + i\sin\Omega t) \quad (4.20)$$

$$\dot{u} = \Omega A(i\cos\Omega t - \sin\Omega t) \quad (4.21)$$

$$\ddot{u} = -\Omega^2 A(\cos\Omega t + i\sin\Omega t) \quad (4.22)$$

Hareket denkleminin harmonik çözümünü Denklem 4.23'de incelersek:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (4.23)$$

Modeldeki her bir düğüm için bilinmeyen maksimum değerleri ve faz değişimlerini çözümledikten sonra, her düğümdeki kuvvet veya yer değiştirmenin kompleks yapıdaki değerleri hesaplanabilir. Denklem 4.24 ve 4.25 elde edilir.

$$\{F\} = \{F_{max} e^{i\varphi}\} e^{i\Omega t} \quad (4.24)$$

$$\{u\} = \{u_{max} e^{i\vartheta}\} e^{i\Omega t} \quad (4.25)$$

Yer değiştirmenin türevlerini alarak elde ettiğimiz hız ve ivmeyi denklemde yerine koyarak Denklem 4.26'daki harmonik hareket denklemini elde ederiz.

$$(-\Omega^2 [M] + i\Omega [C] + [K])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = (\{F_1\} + i\{F_2\}) \quad (4.26)$$

Mod süperpozisyon yöntemi kullanılarak Denklem 4.27'deki modal forma dönüştürülebilir.

$$(-\Omega^2 + i2\omega_j\Omega\zeta_j + \omega_j^2)y_{jc} = f_{jc} \quad (4.27)$$

- φ : Kuvvet Faz Değişimi
- ϑ : Yerdeğişimi faz değişimi
- Ω : Uygulanan dairesel frekans
- ω : Doğal dairesel frekans
- Z : Sönümlenme oranı
- $\{u_1\}$: Reel yerdeğiştirme vektörü
- $\{u_2\}$: İmajinar yerdeğiştirme vektörü
- $\{F_1\}$: Gerçek kuvvet vektörü
- $\{F_2\}$: İmajinar yerdeğiştirme vektörü
- y_{jc} : Kompleks modal koordinatlar
- f_{jc} : Kompleks modal kuvvet

Bilinen frekanslarda tekrarlanacak olan bu sonuçları kullanarak yorulma hasarı ve ömür tahminleri yapılabileceği için harmonik (sinüzoidal) gerilme seviyelerini anlamak önemlidir.

ANSYS programında, Kuşsarayı-2 Köprüsü'nün Harmonik Analiz uygulaması için frekans değer aralığı, modal analizde elde edilen sonuçlardan dolayı 0-10 Hz olarak ayarlanmıştır. Harmonik analiz uygulamasının gerçekleştirilebilmesi için Kuşsarayı-2 Köprüsü'nün ayaklarının ve köprünün başlangıç ile bitiş noktalarının altına sabit mesnet alan sınır şartları tanımlanmıştır ve araç geçişlerinin olduğu köprünün üst bölümüne harmonik yük uygulanmıştır. Uygulanan yük için ilk olarak dört araba yükü düşünülmüştür. Ortalama bir arabanın kütlesi 1500 kg olarak alınmıştır ve köprüye uygulanan kuvveti hesaplayabilmek için toplam dört araba kütlesi yer çekimi ivmesi ile çarpılarak yaklaşık 60 kN olarak hesaplanmıştır. Daha sonradan sonuçların karşılaştırılabilmesi için köprü üzerindeki araba sayısı altı ve sekiz düşünülerek 90 kN ve 120 kN yük için de harmonik analiz uygulanmış ve PEÜ'lerin optimal konumları hesaplanmıştır.

4.3. Piezoelektrik Analiz

Piezoelektrik analiz uygulamasını çözümlerken statik ve dinamik (geçici, modal ve harmonik) durumlar göz önüne alınarak çözümlenmeler yapılmıştır. Statik analizler için piezoelektrik malzemeler, yapısal elastite, piezoelektrik bağlantı ve dielektrik geçirgenlik olarak karakterize edilebilir. Dinamik analiz için ise ek olarak, yoğunluk, yapısal sönümlenme ve dielektrik sönümlenme gibi veriler gerekir. Piezoelektrik malzemeye mekanik bir gerilim uygulandığında elektriksel yük üretir ki buna direkt etki denir, mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşmüş olur. Piezoelektrik malzemeye elektrik voltaj uygulandığında mekanik titreşim elde edilir buna da ters etki denir, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüşmüş olur.

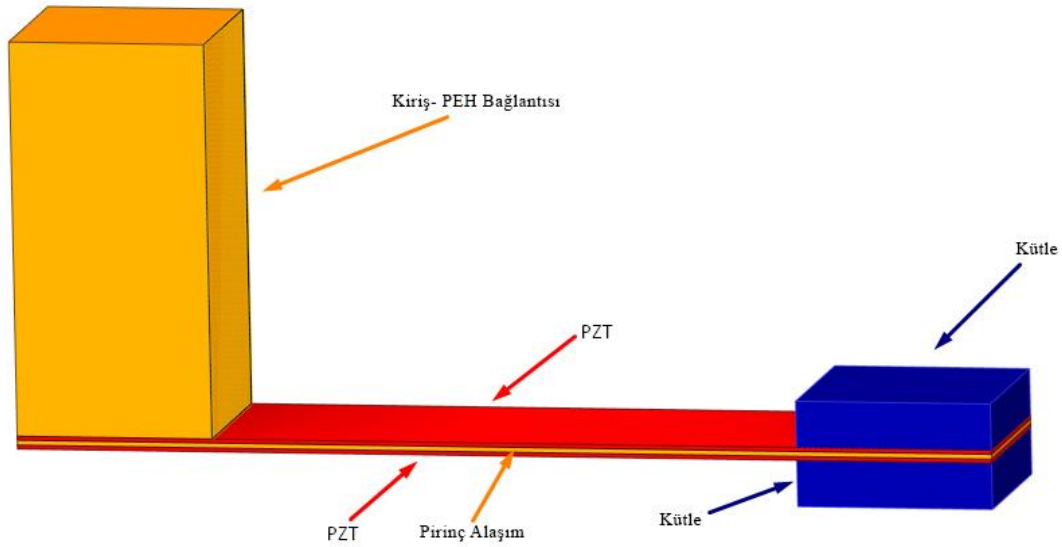
Piezoelektrik analizde, yapısal ve yarı elektostatik alanlar piezoelektrik sabitler $[e]$ aracılığıyla birleştirilir. Denklem 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir.

$$\{T\} = [c]\{S\} - [e]\{E\} \quad (4.28)$$

$$\{D\} = [e]^T\{S\} + [\epsilon]\{E\} \quad (4.29)$$

ANSYS programında, Kuşsarayı-2 Köprüsünde piezoelektrikten enerji üretebilmek amacıyla köprüdeki kirişlerin altına monte edilmek üzere Şekil 4.4'deki gibi iki piezoelektrik katmandan oluşan Bimorph yapıda PEÜ tasarlanmıştır. Piezoelektrik katmanlar 10^8 ohm'luk bir direnç ile birbirine bağlanmıştır. Harmonik analizde elde edilen sonuçlar doğrultusunda köprüdeki maksimum deformasyonun köprünün orta kısmı olduğu belirlenmiştir. PEÜ'lerden maksimum güç elde edebilmek için deformasyonun maksimum olduğu köprünün orta noktasına paralel sıra halinde her kirişin altına bir tane PEÜ olacak şekilde 9 adet PEÜ yerleştirilmiştir. Piezoelektrik analizin gerçekleştirilebilmesi için köprü ayaklarının altına ve köprünün başlangıç ile bitiş noktalarının

altına sabit mesnet alan sınır şartları tanımlanması yapıp araç geçişlerinin olduğu köprünün üst alanına harmonik yük uygulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada farklı piezoelektrik malzemeler (PZT-4, PZT-5A ve PZT-8) ve farklı araç sayıları (4, 6 ve 8) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. PEÜ'nin özellikleri Tablo 4.2'de, piezoelektrik malzemelerin özellikleri ise Tablo 4.3'de verilmiştir [6, 39]. Farklı piezoelektrik malzemeler ve farklı yükler uygulandığı için 9 farklı piezoelektrik analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Piezoelektrik enerji üretici (PEÜ).

Tablo 4.2. Piezoelektrik enerji üreticilerinin özellikleri [6].

Parametreler	Birim	Değer
PZT'nin Uzunluğu	m	0.1
PZT'nin Genişliği	m	0.02
PZT'nin Kalınlığı	m	0.0004
Pirinç Alaşımın Kalınlığı	m	0.0005
Pirinç Alaşımın Elastite Modülü	GPa	100
Pirinç Alaşımın Yoğunluğu	kg/m ³	7165
Direnç Yüğü	Ohm	1x10 ⁸

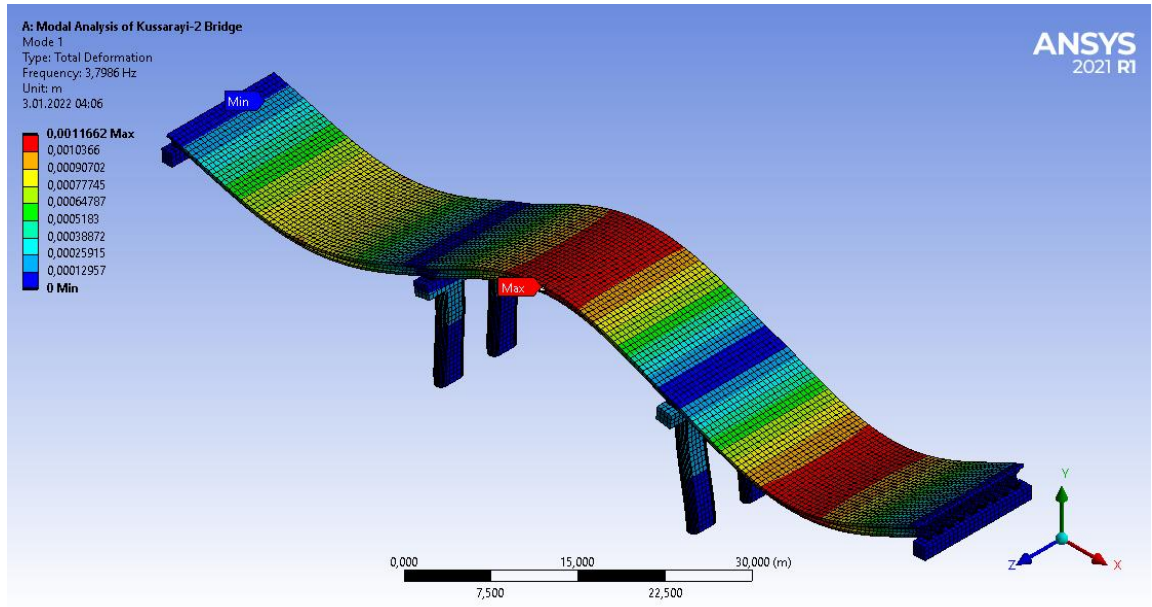
Tablo 4.3. Piezoelektrik malzemelerin özellikleri [39].

Katsayılar	Birim	Sembol	PZT-4	PZT-5A	PZT-8
Elastik Katsayı	GPa	C_{11}	139.0	121.0	149.0
		C_{33}	115.0	111.0	132.0
		C_{44}	25.6	21.1	31.3
		C_{66}	30.6	22.6	34.0
		C_{12}	77.8	75.4	81.1
		C_{13}	74.3	75.2	81.1
Piezoelektrik Katsayı	C/m ²	e_{31}	-5.2	-5.4	-4.1
		e_{33}	15.1	15.8	14.0
		e_{15}	12.7	12.3	10.3
Dielektrik Sabit	nF/m	ϵ_{11}	6.463	8.107	7.968
		ϵ_{33}	5.622	7.346	5.312
Kütle Yoğunluğu	kg/m ³	ρ	7500	7750	7600
Elektriksel Geçirgenlik	pF/m	ϵ_0	8.854	8.854	8.854

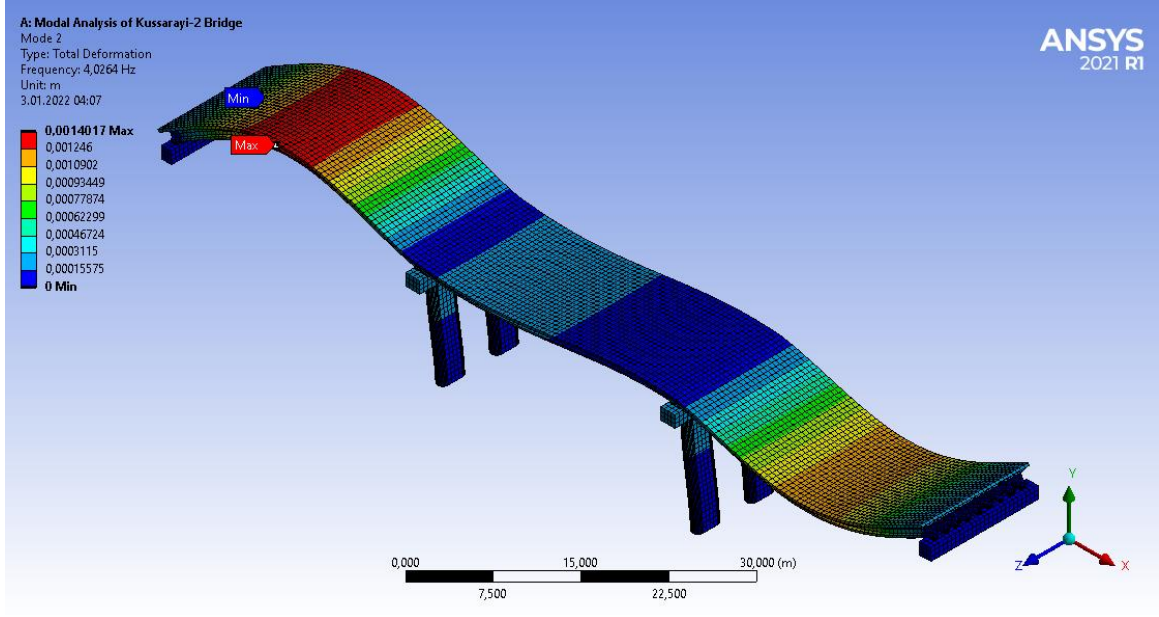
Gerçekleştirilen Modal, Harmonik ve Piezoelektrik analiz çözümleri Bölüm 5’de detaylı bir şekilde grafikler ile verilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

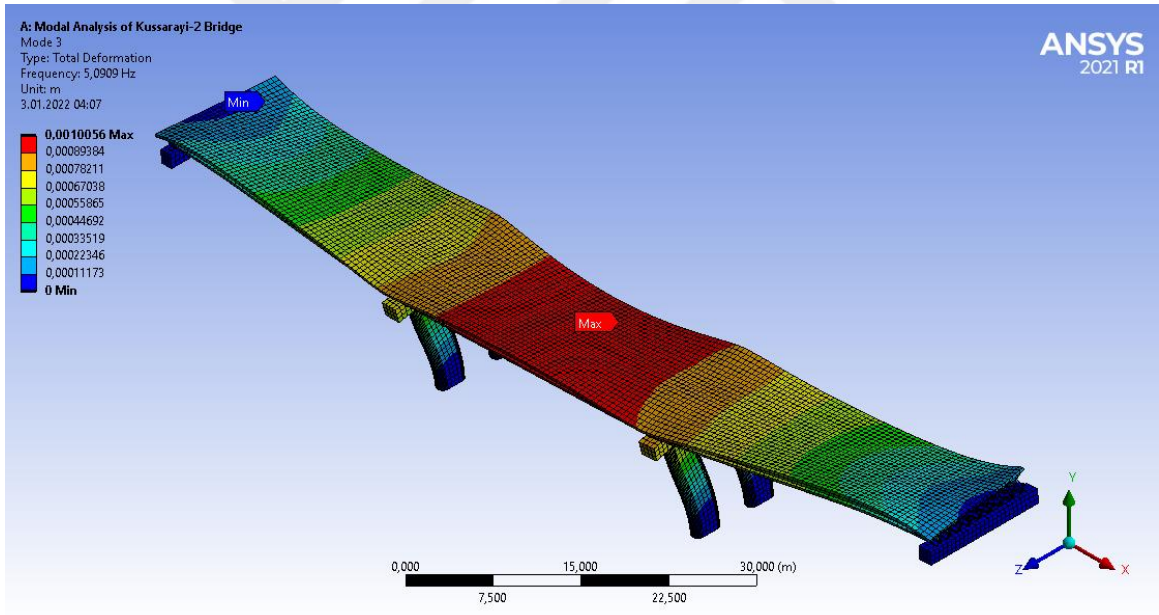
Tüm fiziksel yapılar doğal frekanslara sahiptir. Nesnenin doğal frekansında bir kuvvet uygulandığında, rezonansa girer ve daha yüksek bir genlik titreşim tepkisi oluşur. Köprünün Modal analiz (yüksüz durumdaki) uygulamasında doğal frekanslar, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 nolu modlara göre sırasıyla 3.7986, 4.0264, 5.0909, 5.3150, 8.3372 ve 9.7049 Hz'dir. Bu değerlere göre doğal frekanslarda köprü üzerindeki rezonans hallerinin deformasyonları Şekil 5.1-5.6'da gösterilmiştir. En düşük doğal frekans (3.7986 Hz) değeri ile elde ettiğimiz toplam deformasyon görüntüsü Şekil 5.1'de verilmiştir. Maksimum toplam deformasyon 0.0011662 m olarak, köprünün orta noktalarına denk gelmektedir. Köprünün ayak kısımlarında ise en düşük titreşim nedeniyle toplam deformasyon sıfır olarak belirlenmiştir. Doğal frekans analizleri ile yapısal sistemin doğal frekanslarını ve bu frekans değerinde tahrik edilmeleri halinde alacakları mod şekilleri elde edilmiştir. Sistemin ilk mod şekli en düşük potansiyel enerjili şekle aittir ve dolayısıyla birim uzama enerjisi diğerlerine oranla daha düşüktür. İkinci, üçüncü ve diğer mod şekillerinin oluşumunda gittikçe artan bir iç birim şekil değiştirme enerjisine ihtiyaç duyulur. En yüksek frekans (9.7049 Hz) değerinde ise görünüm Şekil 5.6'da verilmiştir. Burada da en yüksek toplam deformasyon 0.0021247 m olarak hesaplanmıştır. Köprünün birinci, ikinci ve dördüncü mod şekillerinde eğilme etkisi görülmektedir. Köprünün üçüncü, beşinci ve altıncı modlarında eğilme ve burulma etkisi birlikte görülmektedir.



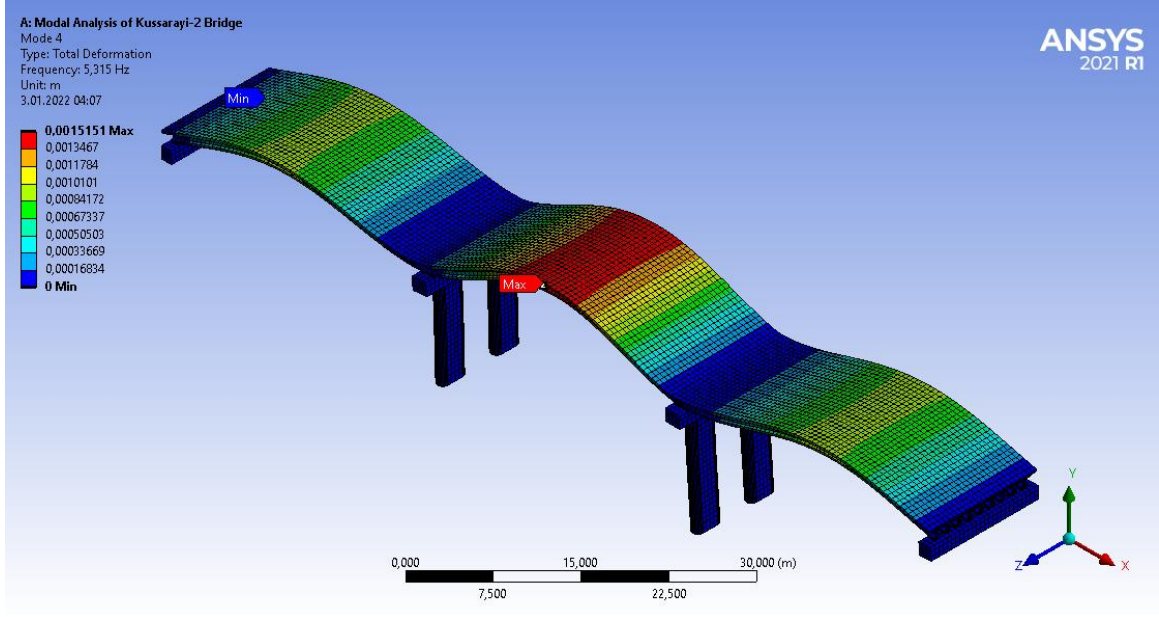
Şekil 5.1. Köprünün modal analiz ile 3.7986 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 1).



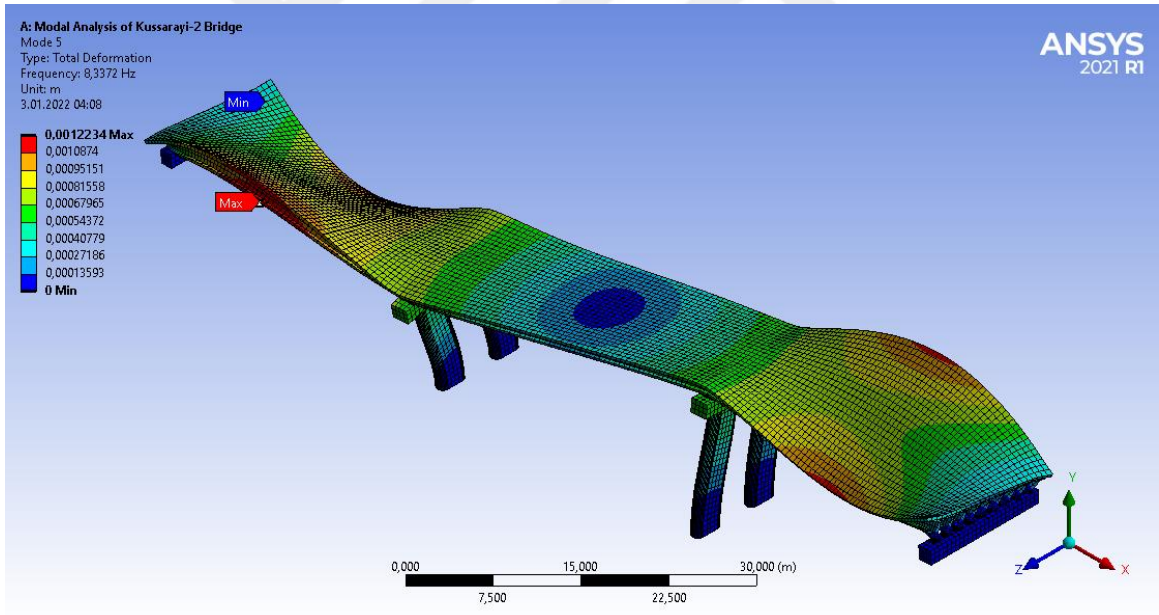
Şekil 5.2. Köprünün modal analiz ile 4.0264 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 2).



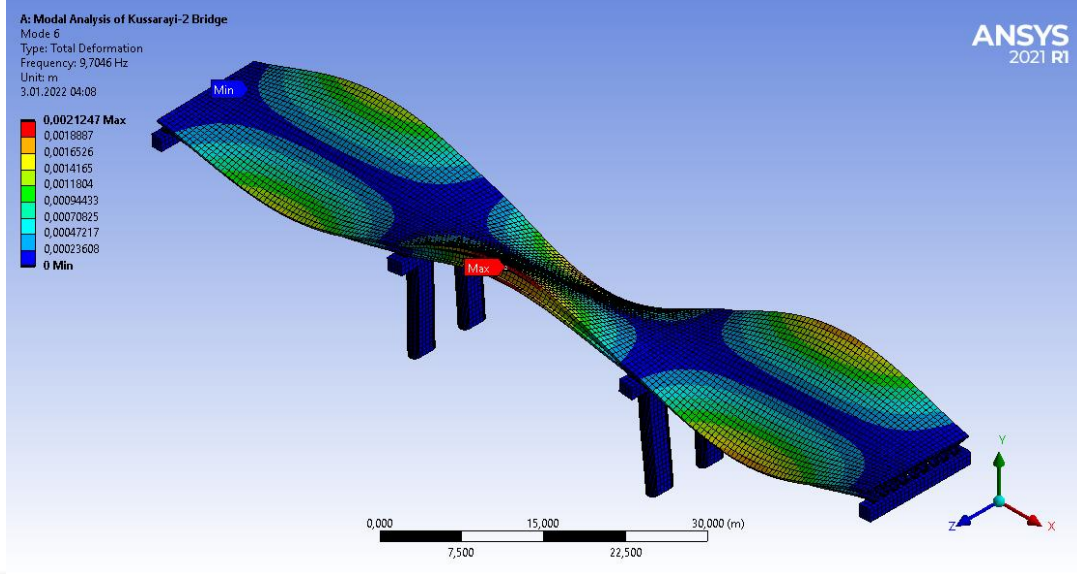
Şekil 5.3. Köprünün modal analiz ile 5.0909 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 3).



Şekil 5.4. Köprünün modal analiz ile 5.3150 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 4).

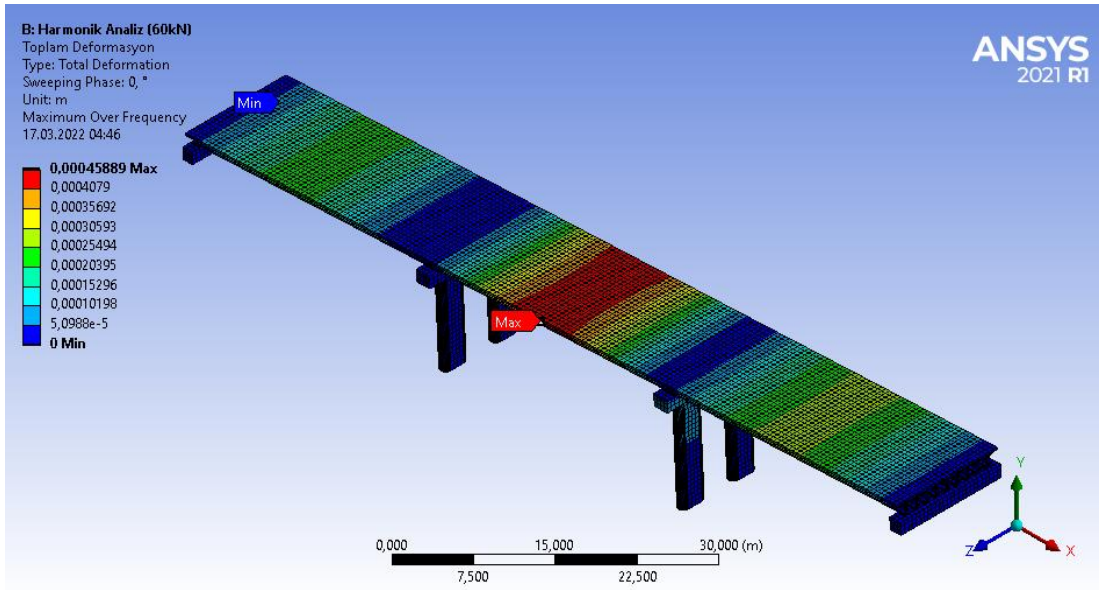


Şekil 5.5. Köprünün modal analiz ile 8.3372 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 5).

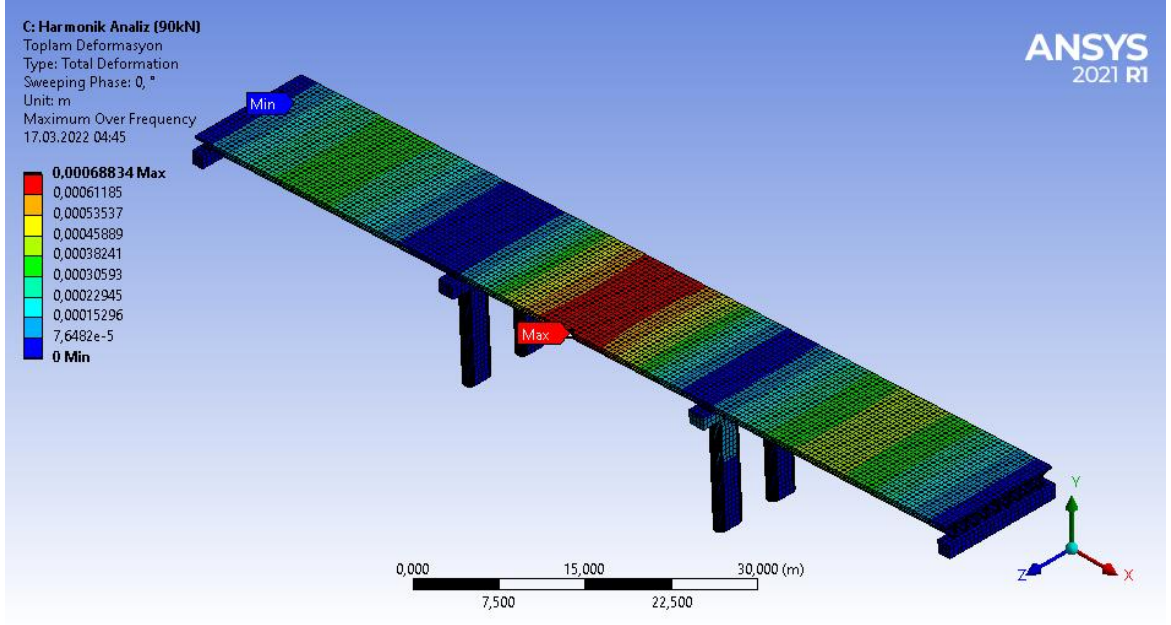


Şekil 5.6. Köprünün modal analiz ile 9.7046 Hz'lik doğal frekansındaki toplam deformasyon görünümü (Mod 6).

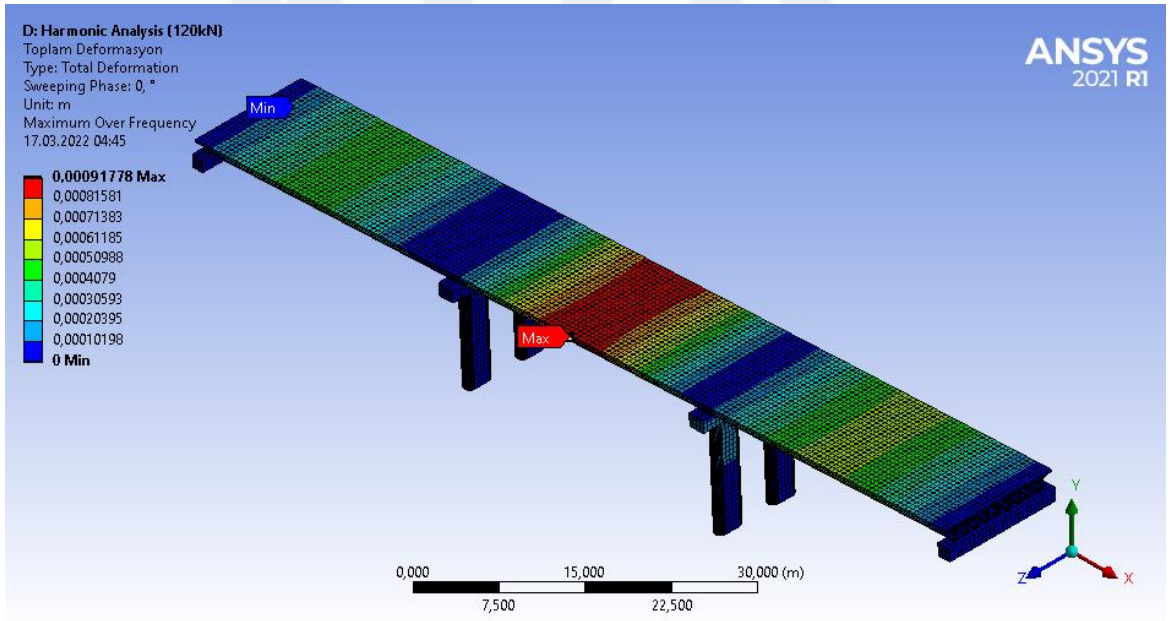
Kuşarayı-2 Köprüsü'nün üzerindeki araç sayısı dört, altı ve sekiz alınarak 60 kN, 90 kN ve 120 kN yük uygulanan harmonik analiz uygulamasında deformasyon sonuçları elde edilmiştir ve sonuçların yükle doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Elde edilen deformasyon sonuçlarına göre 60 kN, 90 kN ve 120 kN yük altındaki köprüdeki maksimum deforme miktarlarının sırasıyla 0.00045889 m, 0.00068834 m ve 0.00091778 m olarak hesaplandığı ve bu miktarların köprünün tam orta çizgisinde meydana geldiği görülmüştür. Bu yük altındaki köprünün maksimum deformasyona uğradığı köprü görselleri Şekil 5.7-5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.7. 60 kN yük altındaki harmonik analiz görünümü.

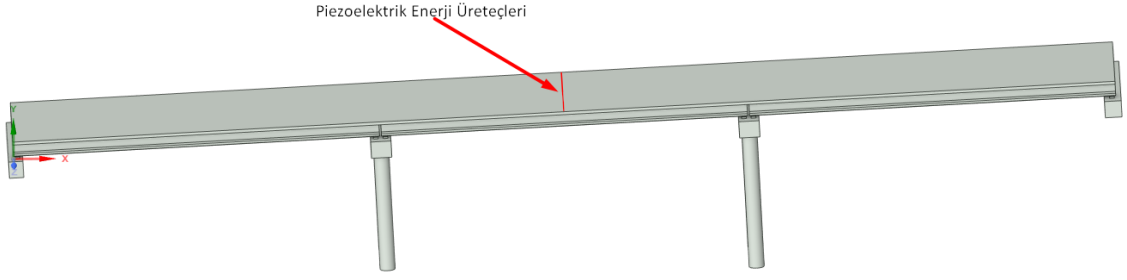


Şekil 5.8. 90 kN yük altındaki harmonik analiz görünümü.

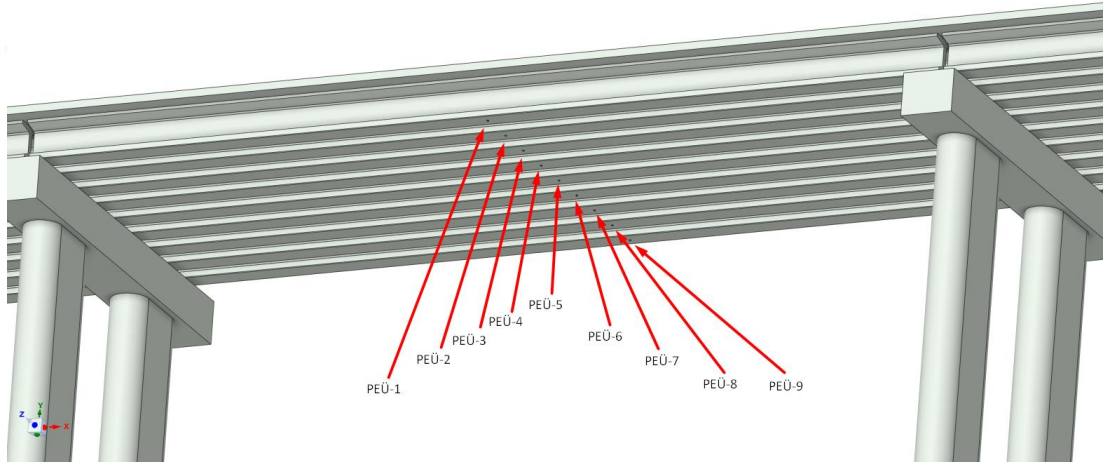


Şekil 5.9. 120 kN yük altındaki harmonik analiz görünümü.

Sonuçlar incelendiğinde PEÜ'lerin optimal konumlarının deformasyonun en yüksek olduğu köprünün tam orta çizgisinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.10). Köprünün orta kısmında yol istikametine dikey şekilde her bir kirişin altına bir tane olmak üzere toplamda 9 adet Bimorph yapıda PEÜ monte edilmiştir ve bu görsel Şekil 5.11'de verilmiştir.

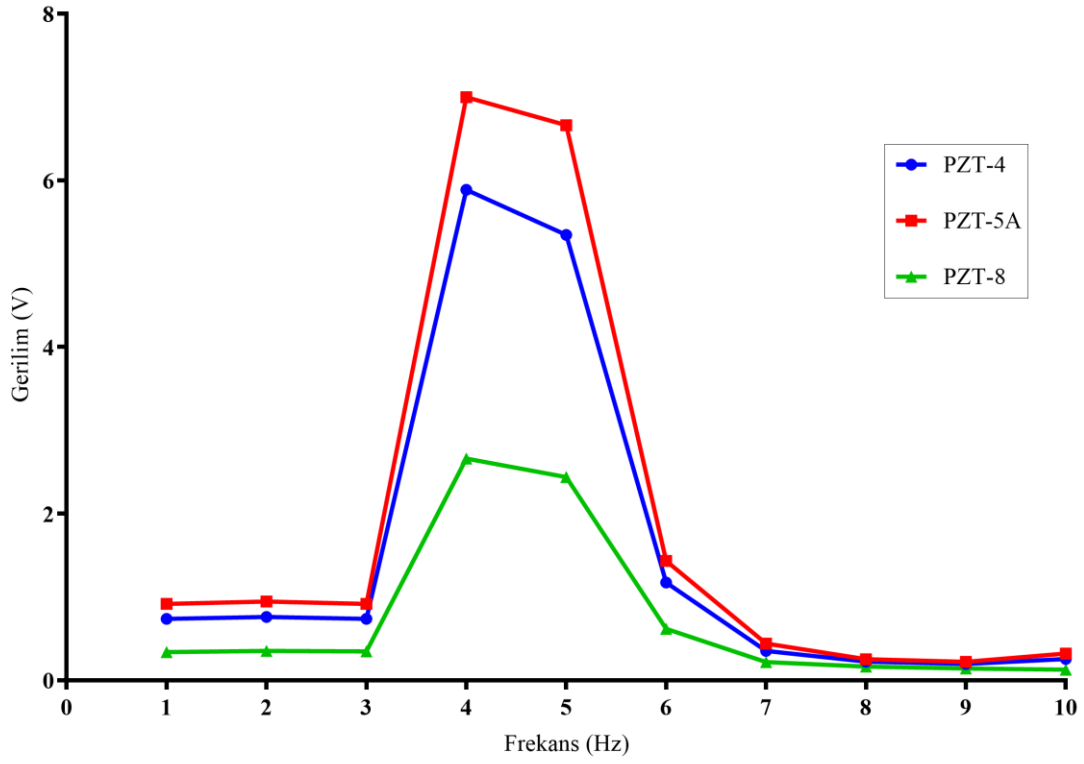


Şekil 5.10. PEÜ'lerin konumu.

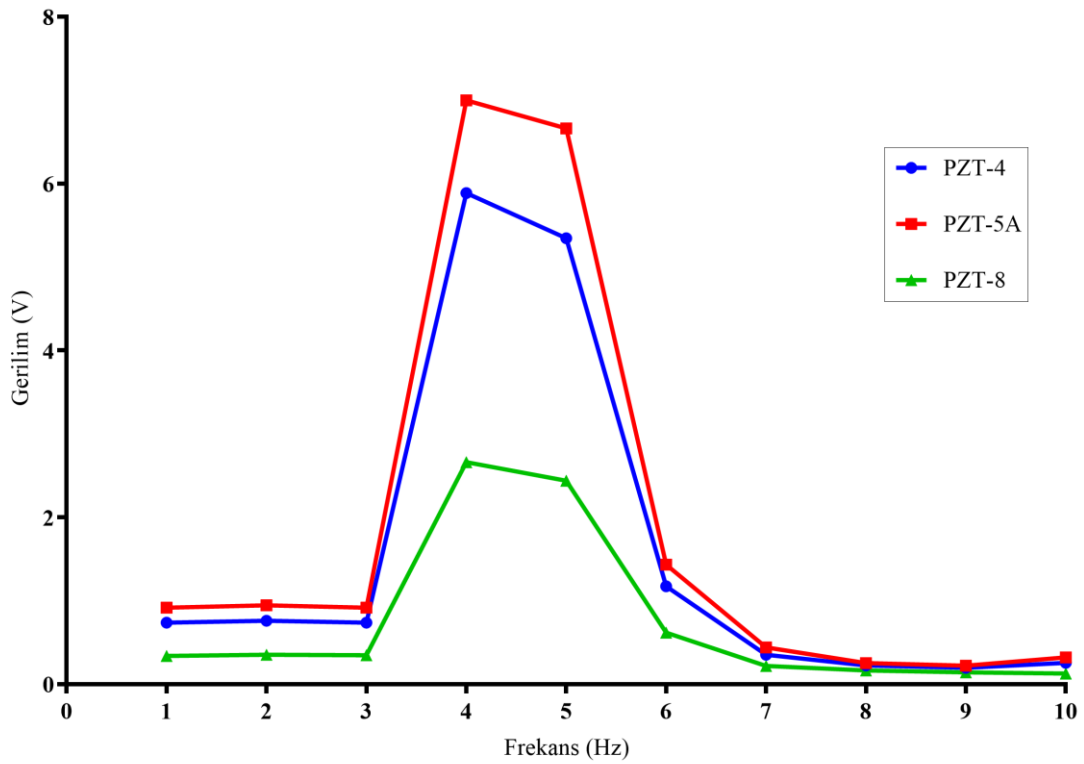


Şekil 5.11. PEÜ'lerin konumu.

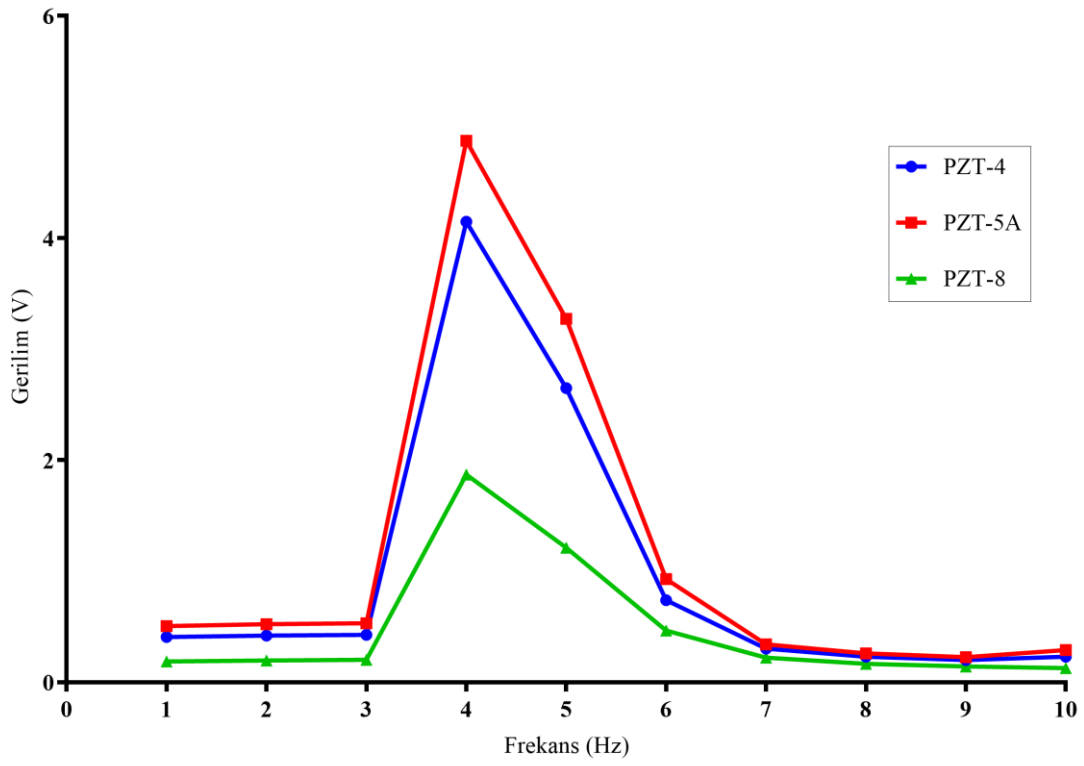
Piezoelektrik sistemlerden enerji üretebilmek amacıyla harmonik analizden elde edilen sonuçlardan faydalanarak toplam 9 adet PEÜ farklı PZT tipleri (PZT-4, PZT-5A ve PZT-8) ile çözümlenmesi yapılmıştır. Bu çözümlenme sonucunda ise PEÜ'lerin maksimum gerilim değeri 4 Hz frekansta ölçülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında elde edilen gerilim büyüklüklerinin sırasıyla PZT-5A, PZT-4 ve PZT-8 tipli PEÜ'lerinde oluştuğu ve uygulanan 60 kN, 90 kN ve 120 kN yükler için de sonuçların doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Üretilen maksimum gerilimler; PEÜ-1'de 7 V (Şekil 5.12 ve 5.13), PEÜ-2'de 4.88 V (Şekil 5.14 ve 5.15), PEÜ-3'de 3.80 V (Şekil 5.16 ve 5.17), PEÜ-4'de 3.25 V (Şekil 5.18 ve 5.19), PEÜ-5'de 3.02 V (Şekil 5.20 ve 5.21), PEÜ-6'da 3.03 V (Şekil 5.22 ve 5.23), PEÜ-7'de 3.06 V (Şekil 5.24 ve 5.25), PEÜ-8'de 3.20 V (Şekil 5.26 ve 5.27) ve PEÜ-9'da 3.59 V (Şekil 5.28 ve 5.29) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı grafiklerle bahsedilen şekillerde gösterilmiştir.



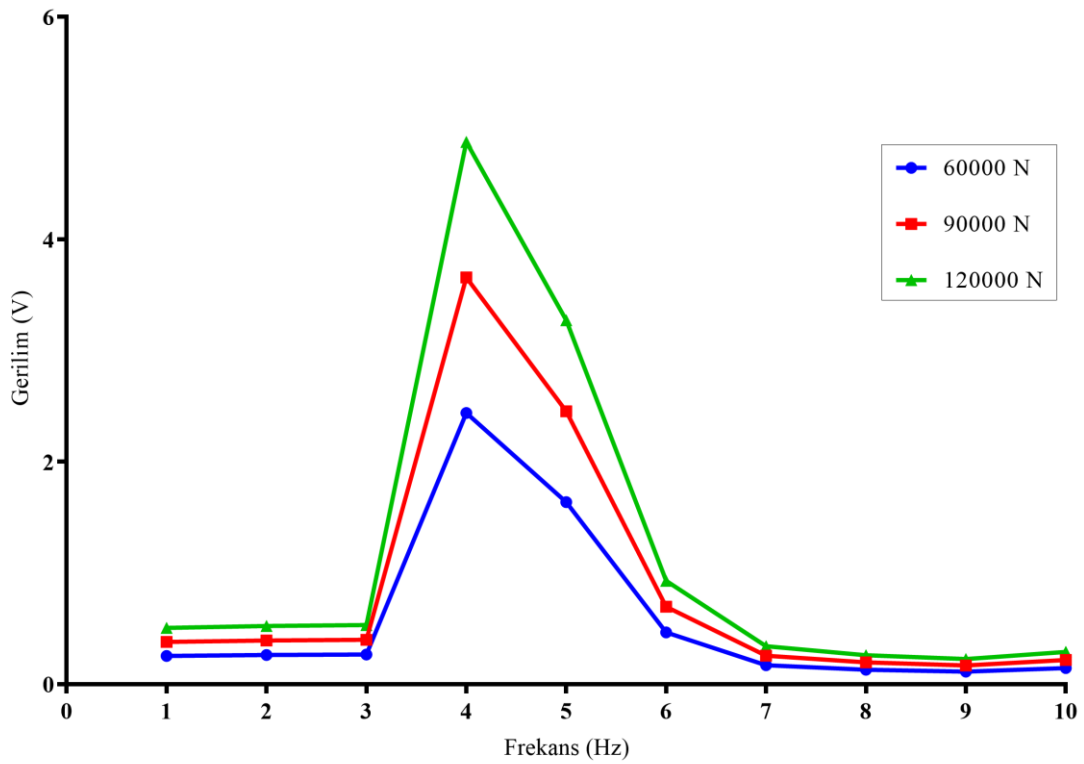
Şekil 5.12. 120 kN yük altında PEÜ-1'in farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



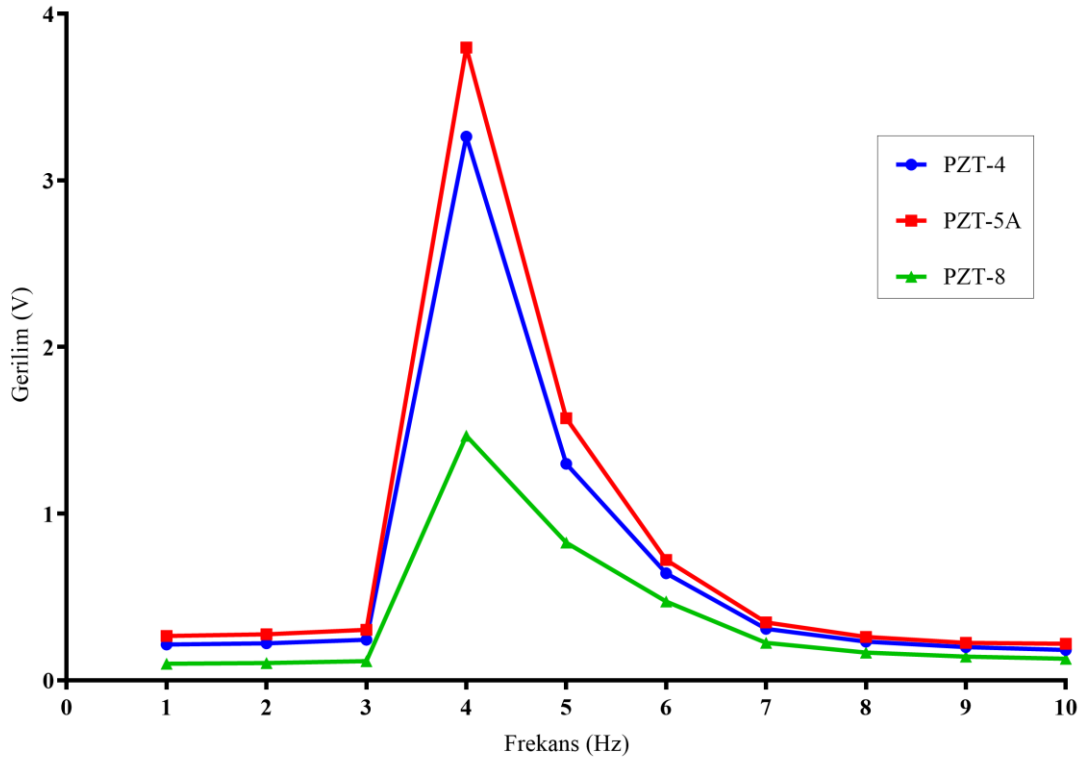
Şekil 5.13. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-1'in gerilim frekans değişimi.



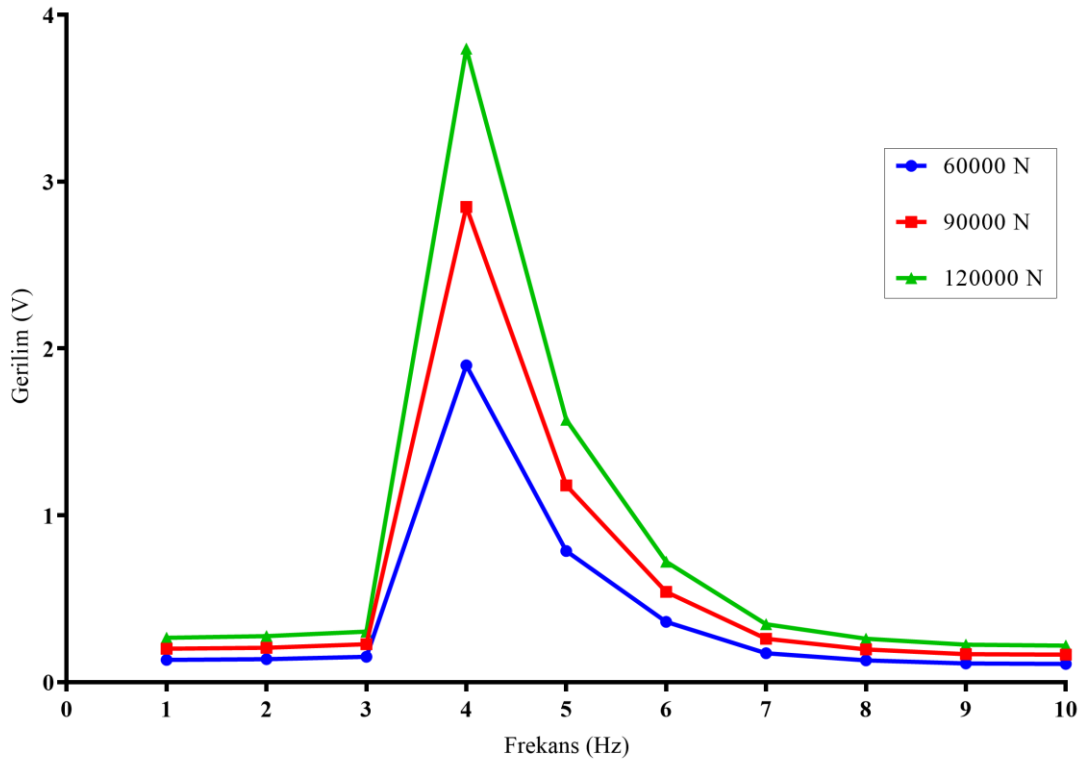
Şekil 5.14. 120 kN yük altında PEÜ-2'nin farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



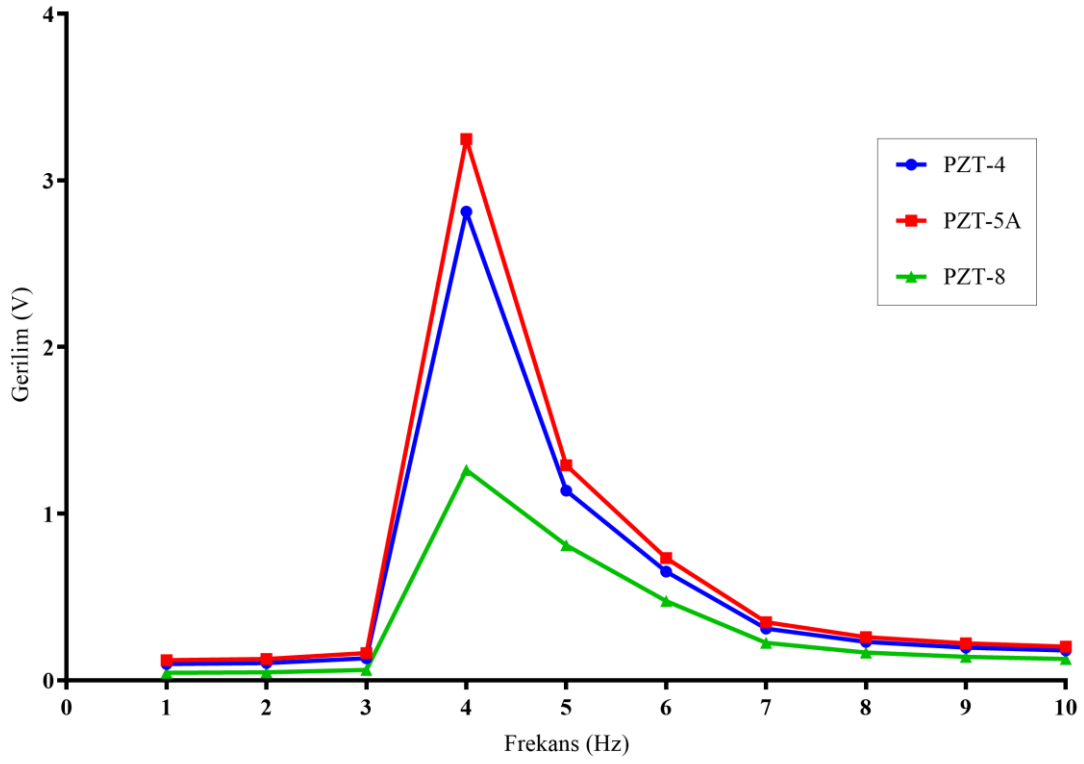
Şekil 5.15. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-2'nin gerilim frekans değişimi.



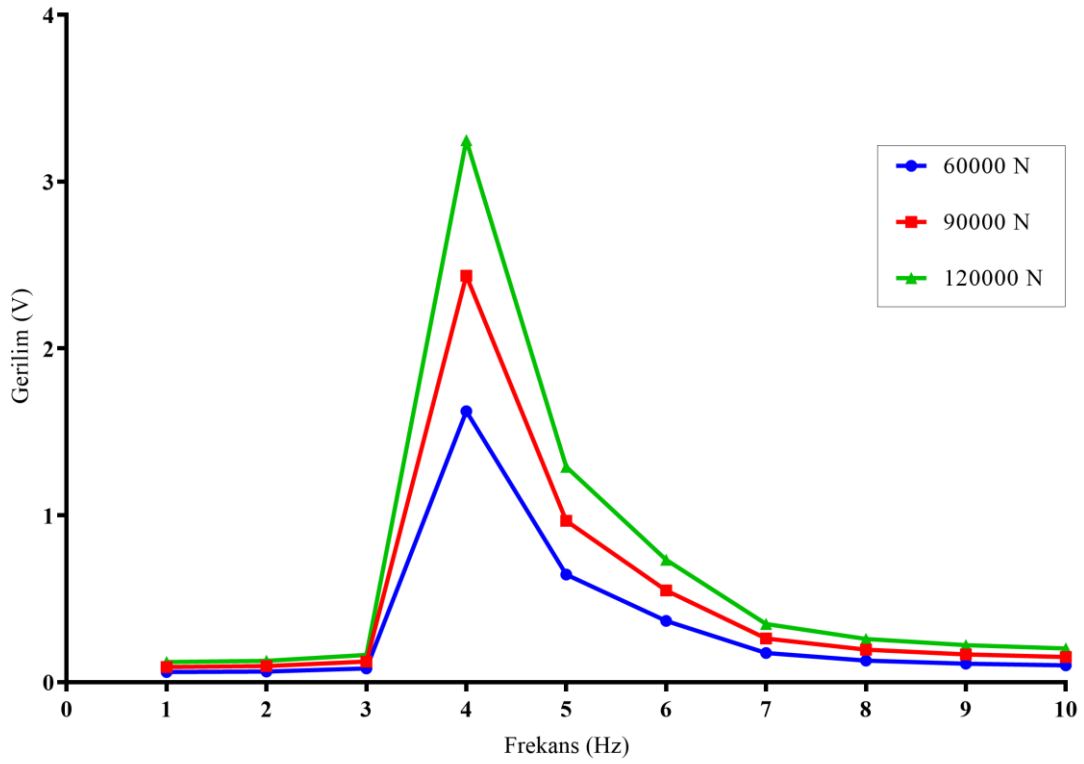
Şekil 5.16. 120 kN yük altında PEÜ-3'ün farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



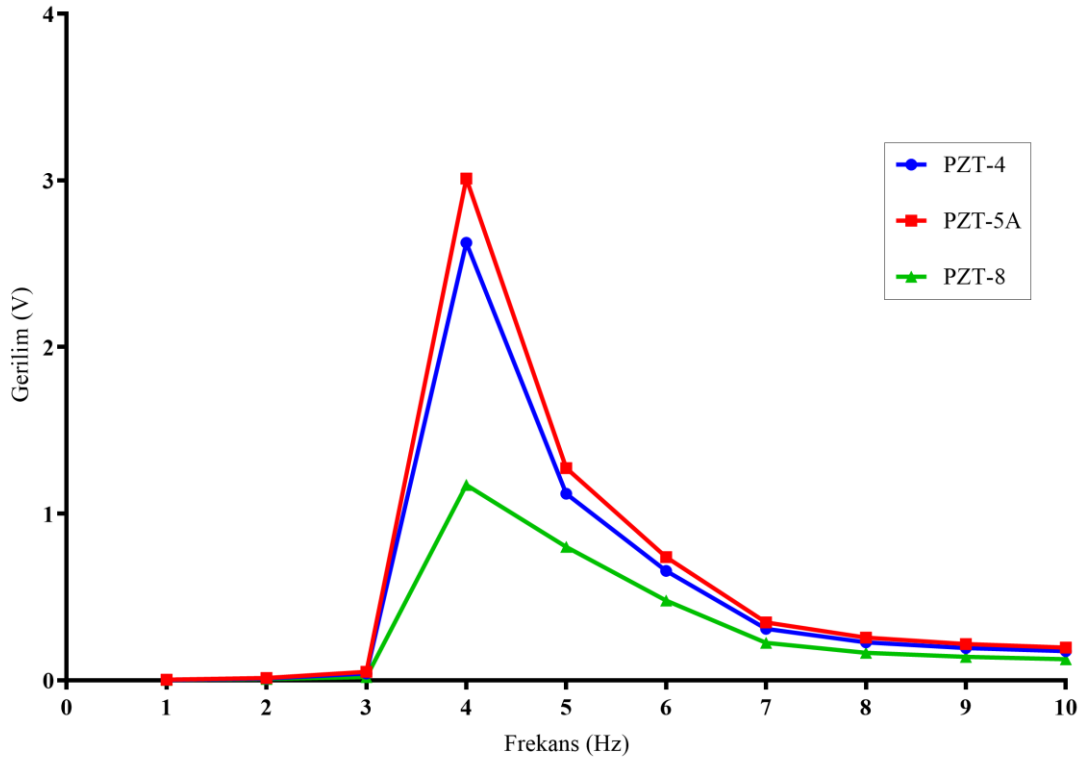
Şekil 5.17. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-3'ün gerilim frekans değişimi.



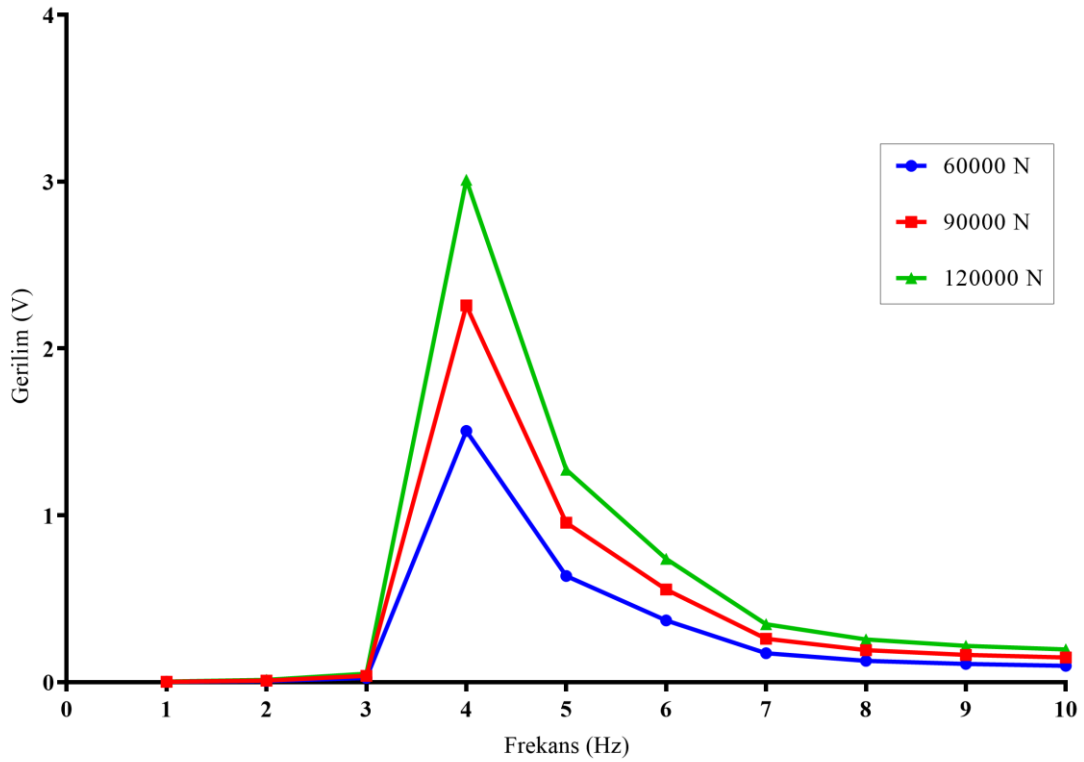
Şekil 5.18. 120 kN yük altında PEÜ-4'ün farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



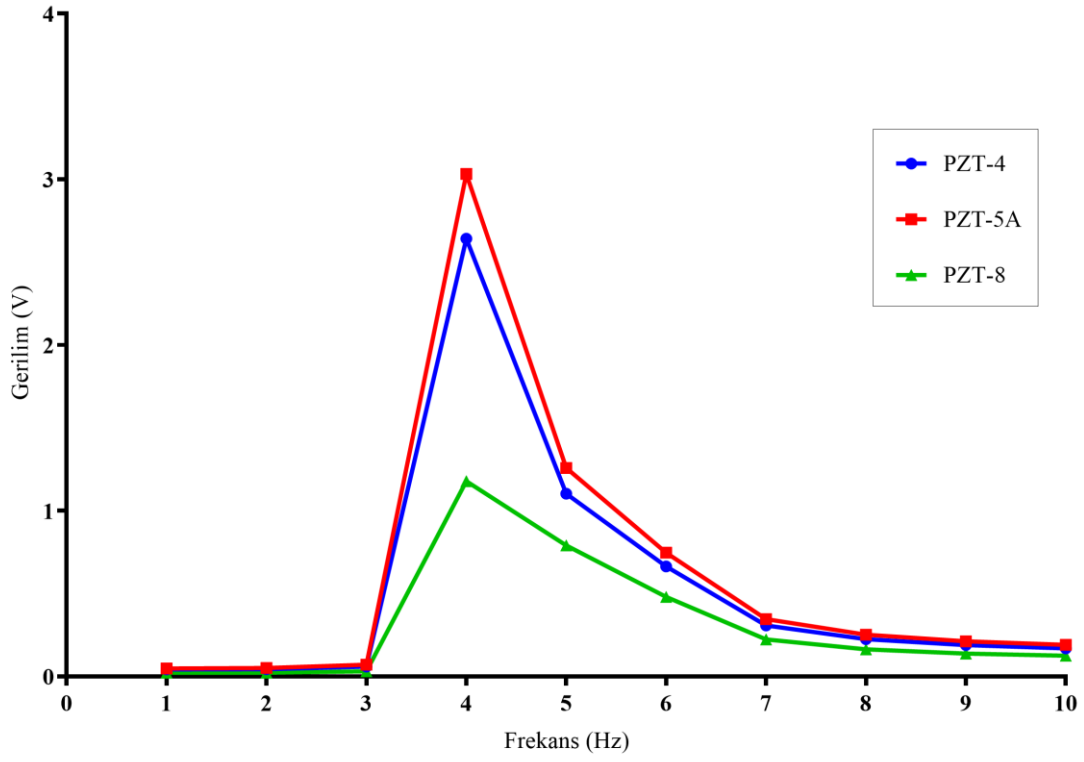
Şekil 5.19. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-4'ün gerilim frekans değişimi.



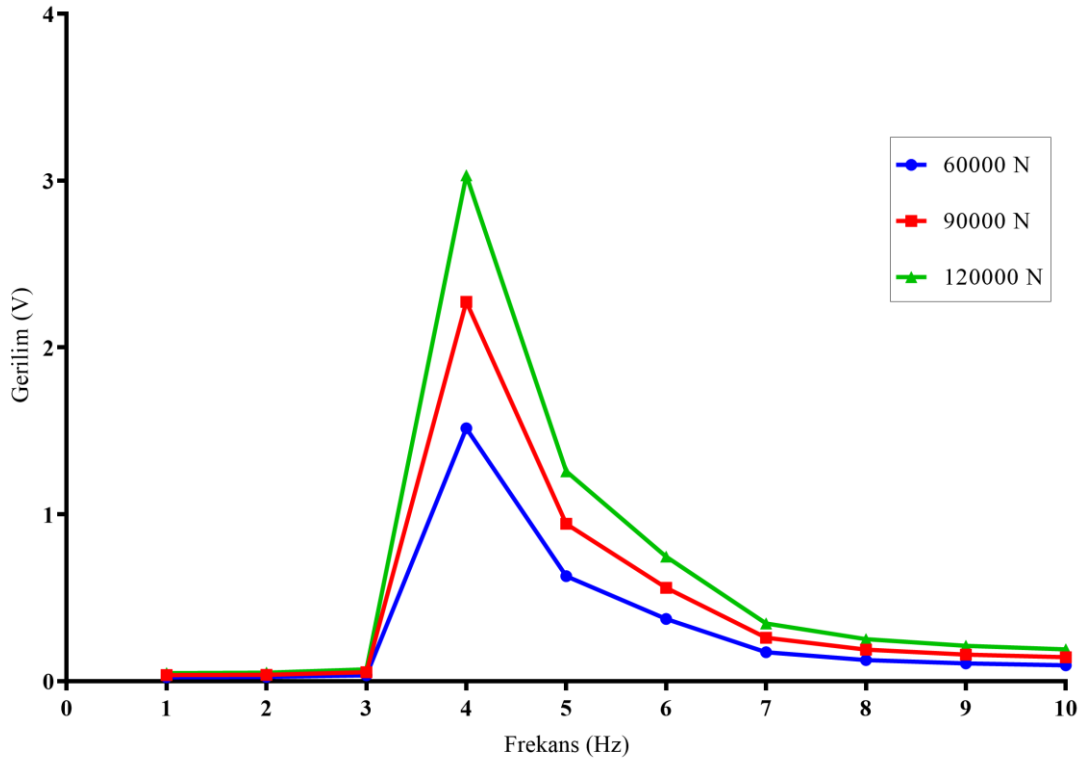
Şekil 5.20. 120 kN yük altında PEÜ-5'in farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



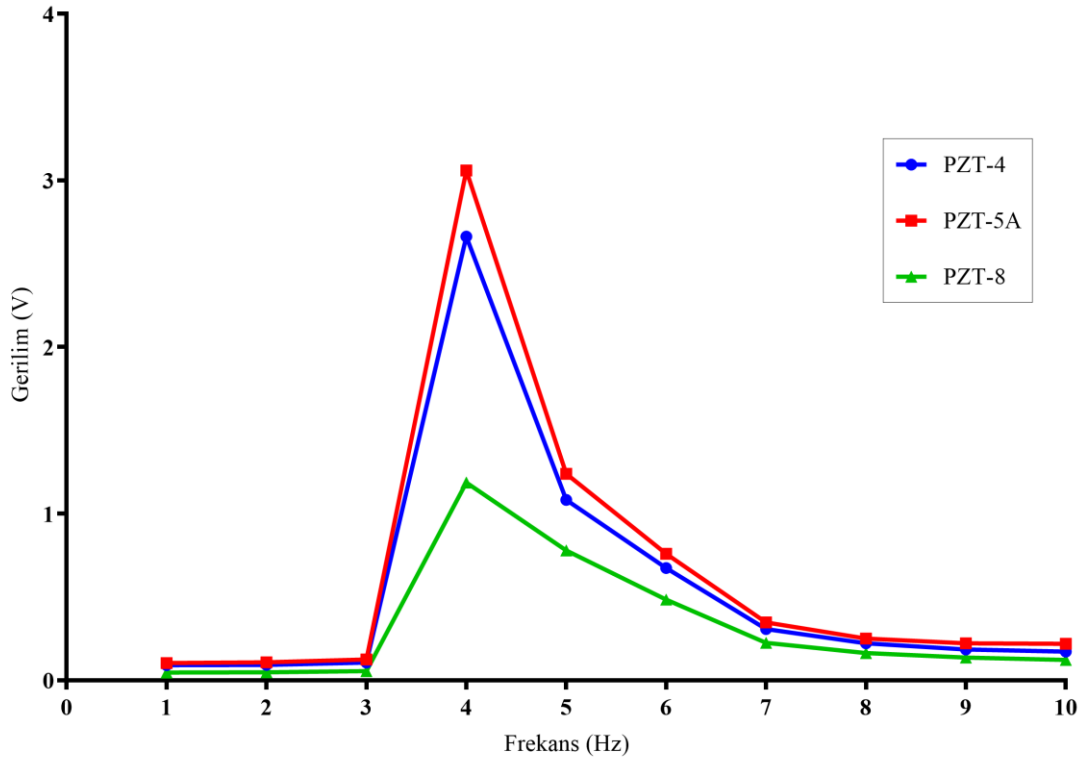
Şekil 5.21. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-5'in gerilim frekans değişimi.



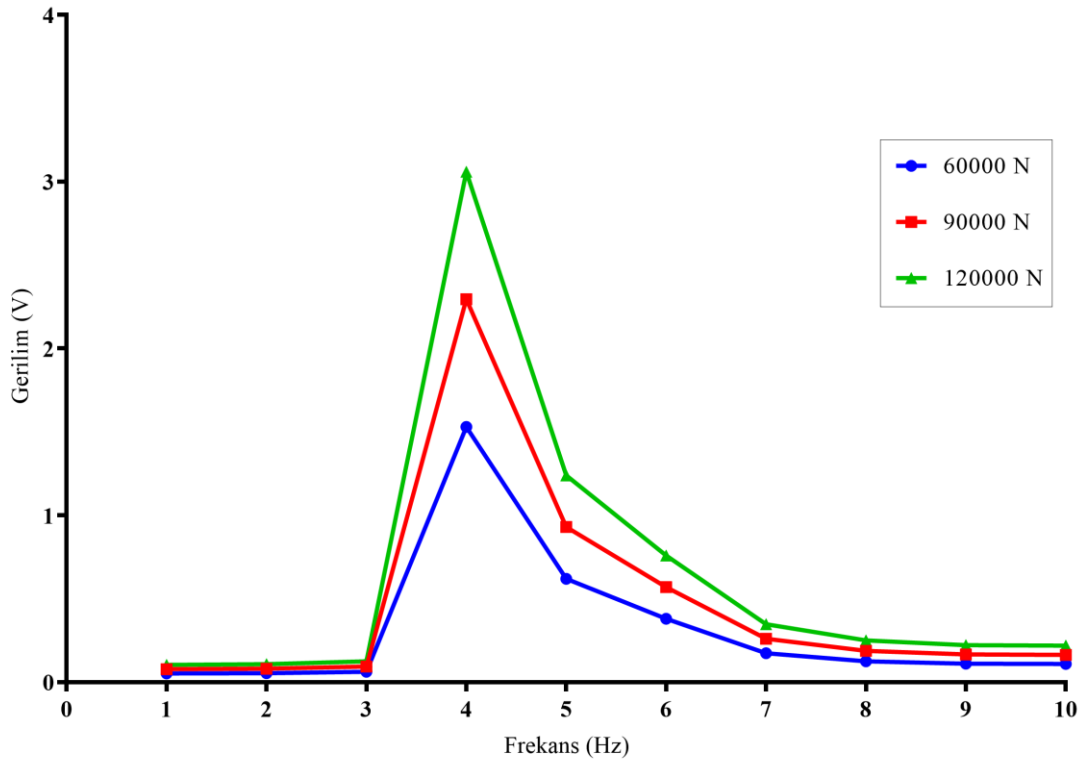
Şekil 5.22. 120 kN yük altında PEÜ-6'nın farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



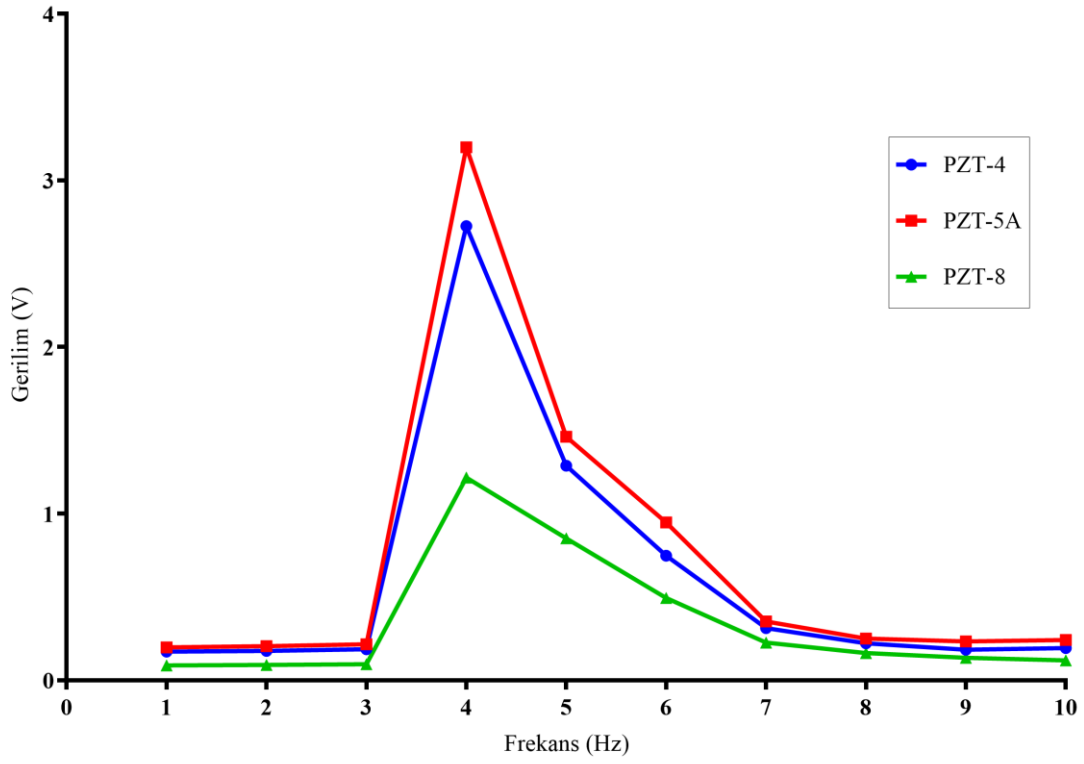
Şekil 5.23. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-6'nın gerilim frekans değişimi.



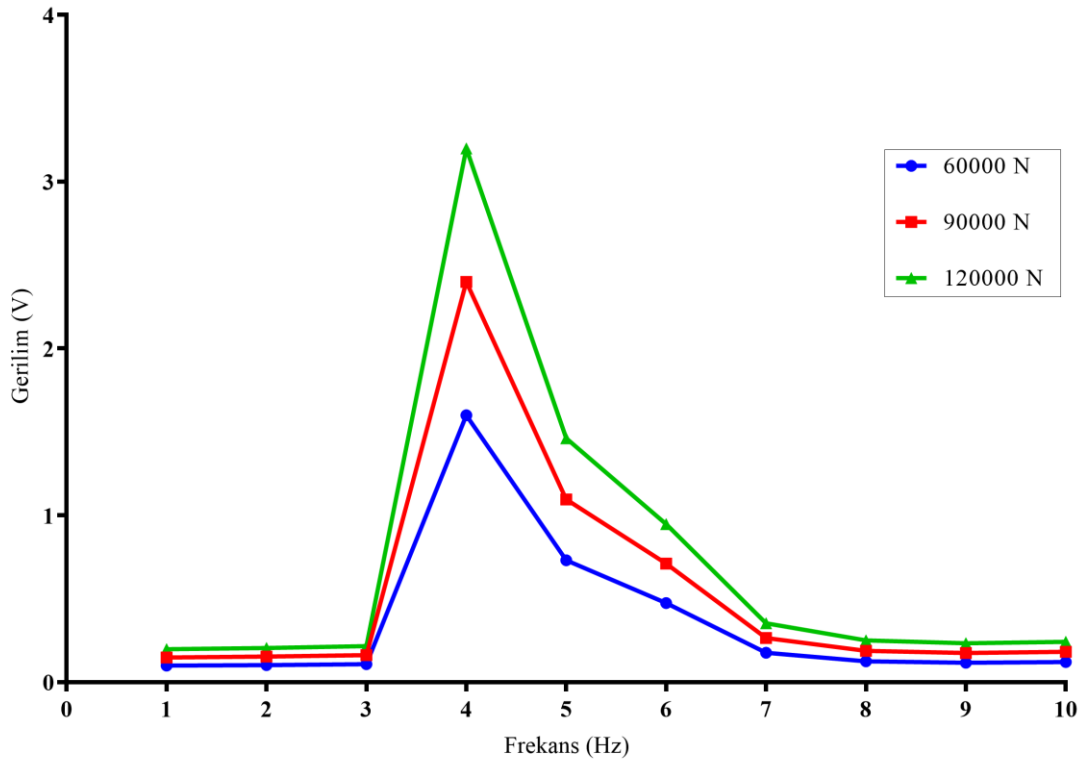
Şekil 5.24. 120 kN yük altında PEÜ-7'nin farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



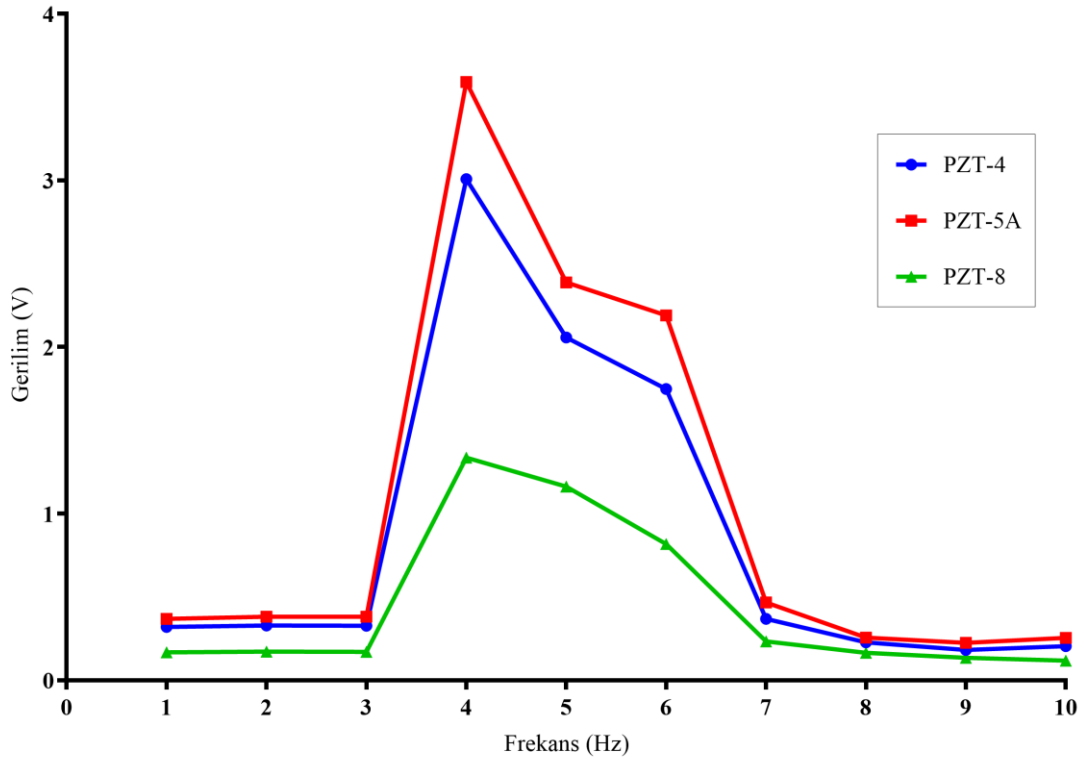
Şekil 5.25. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-7'nin gerilim frekans değişimi.



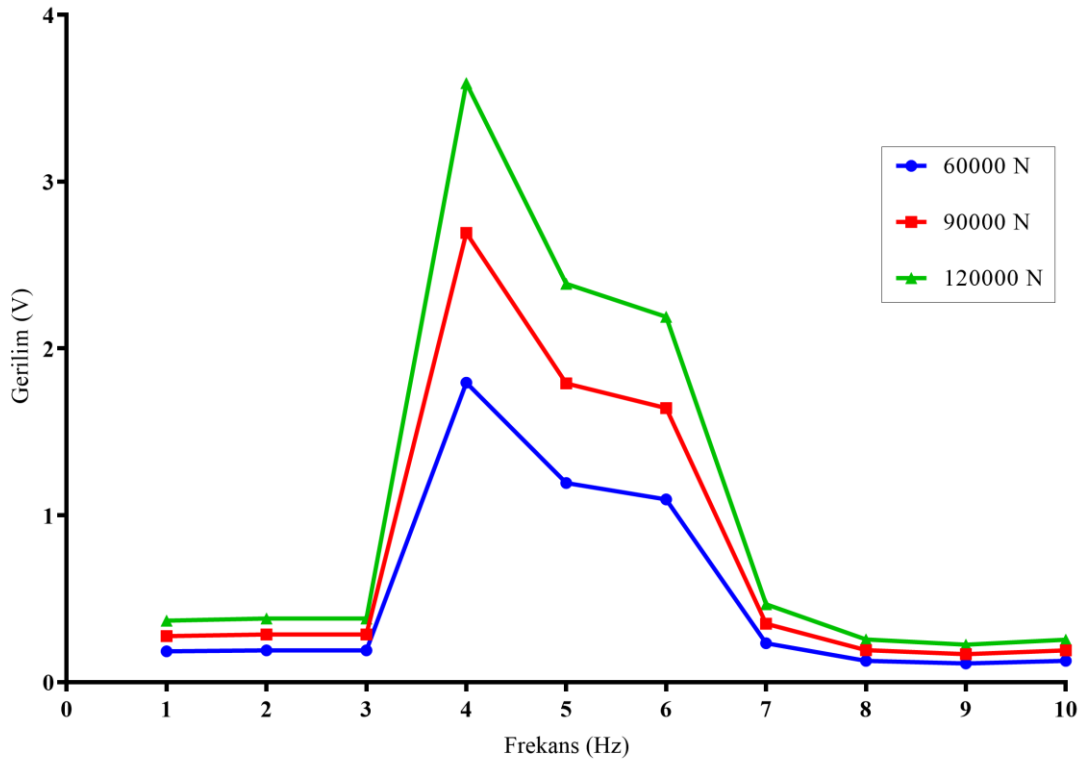
Şekil 5.26. 120 kN yük altında PEÜ-8'in farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.



Şekil 5.27. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-8'in gerilim frekans değişimi.



Şekil 5.28. 120 kN yük altında PEÜ-9'un farklı malzeme tiplerine göre gerilim frekans değişimi.

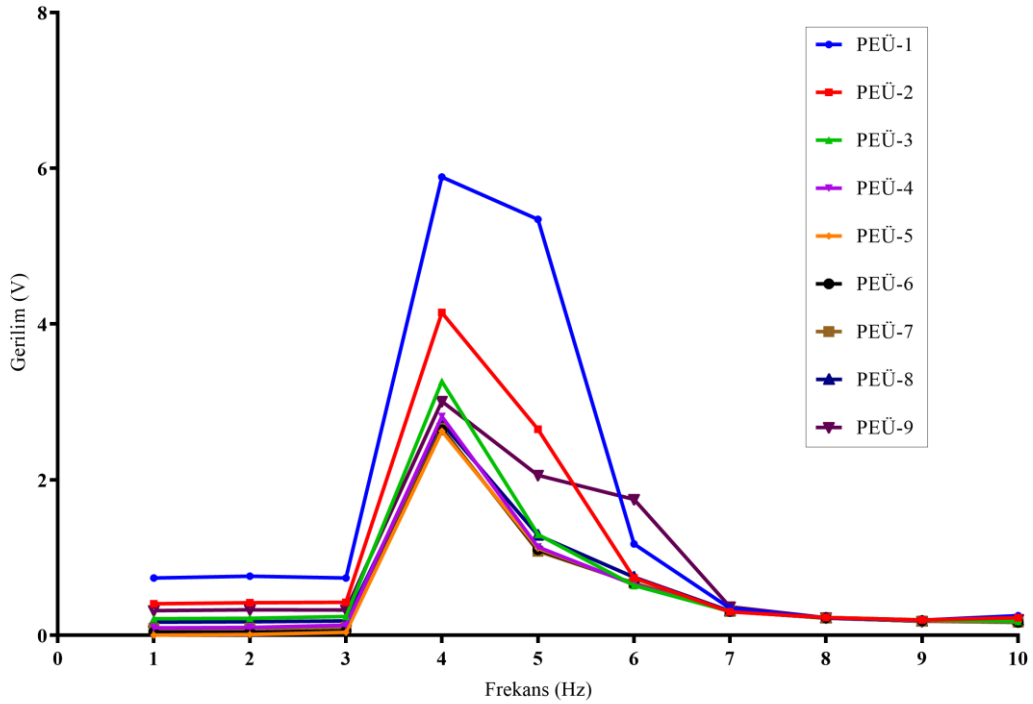


Şekil 5.29. Farklı yükler altında PZT-5A için PEÜ-9'un gerilim frekans değişimi.

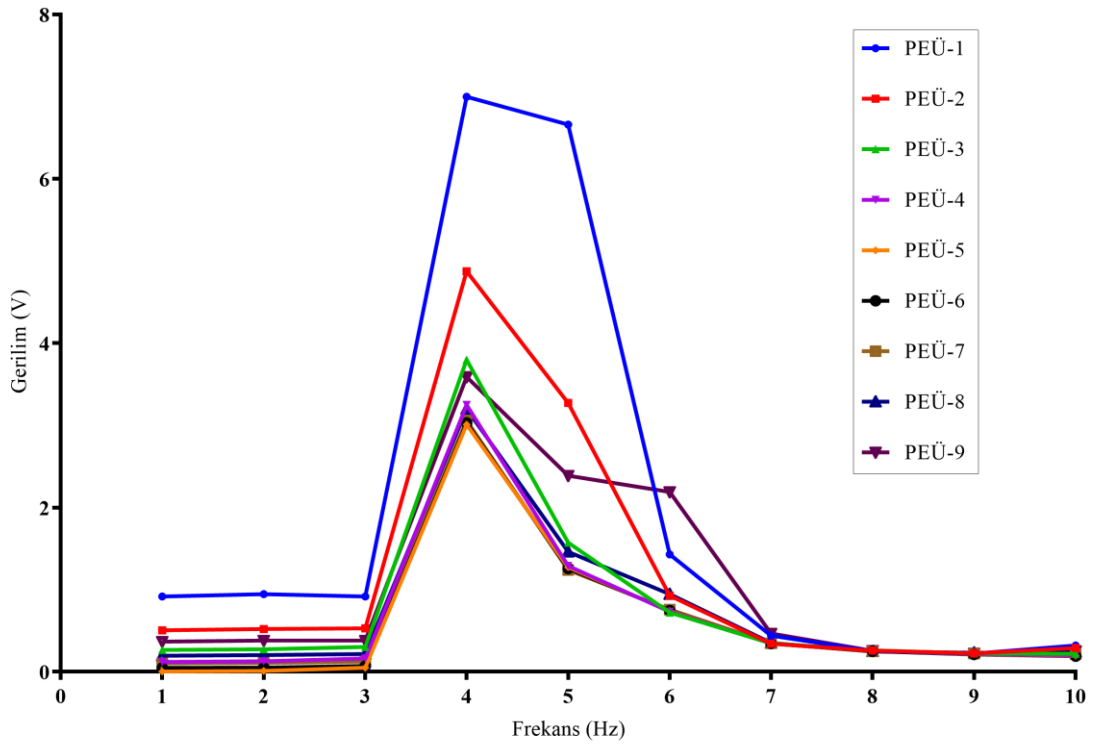
Maksimum gerilimin olduğu 120 kN yük altındaki PZT-4, PZT-5A ve PZT-8 tipli PEÜ'lerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.30-5.32'de verilmiştir. Tablo 5.1'de ise PZT-4, PZT-5A ve PZT-8 malzemeli PEÜ'lerin 60 kN, 90 kN ve 120 kN yük altındaki ürettikleri maksimum gerilim değerleri verilmiştir. Maksimum gerilim değerleri kullanılarak PEÜ'lerden üretilen maksimum güç miktarları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'deki gibi verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılmalı grafik olarak Şekil 5.33'de gösterilmiştir.

Yapılan piezoelektrik analizde PZT tipleri incelendiğinde en fazla gücün PZT-5A'da üretildiği görülmüş ve 120 kN yük altından PZT-5A malzemeli PEÜ'lerden 1.484 μ W maksimum toplam güç elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.34'de gösterilmiştir. PEÜ'lerden üretilen maksimum güçler ise; PEÜ-1'de 0.49 μ W, PEÜ-2'de 0.24, PEÜ-3'de 0.14 μ W, PEÜ-4'de 0.11 μ W, PEÜ-5'de 0.091 μ W, PEÜ-6'da 0.092 μ W, PEÜ-7'de 0.094, PEÜ-8'de 0.10 ve PEÜ-9'da 0.13 μ W olarak hesaplanmıştır.

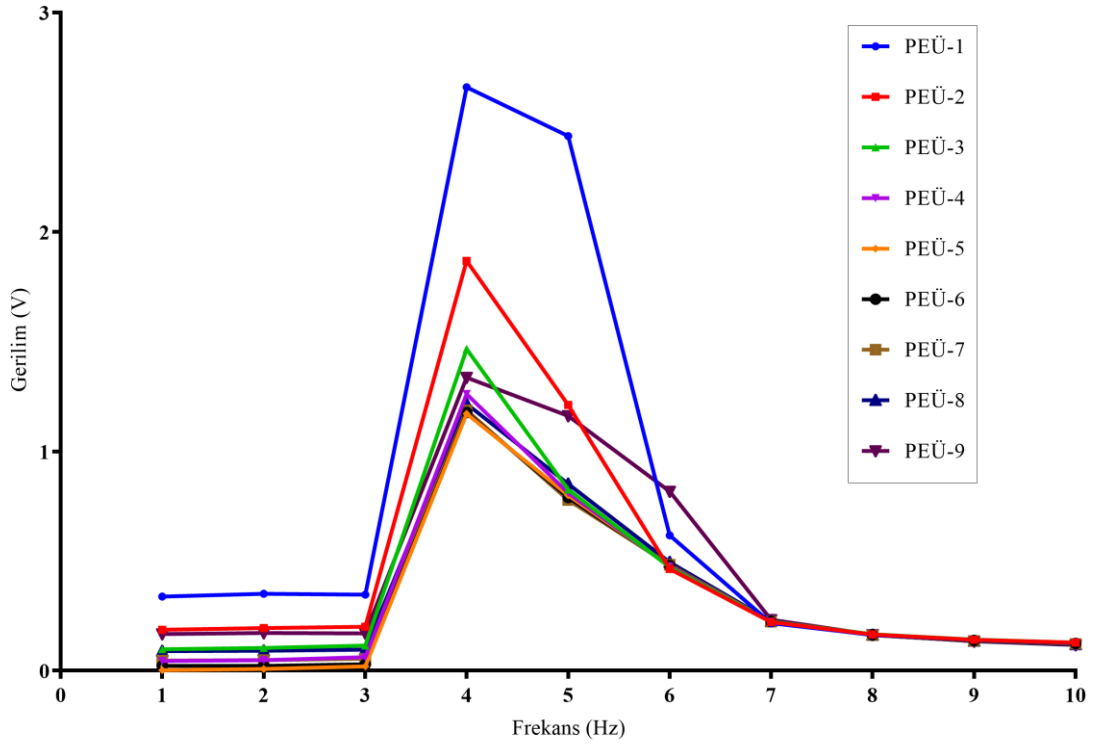
Daha önceki çalışmaları incelediğimizde Peigney ve Siegert'in yaptığı çalışmada araç geçişlerinin olduğu bir köprünün altındaki borulara PEÜ'nin optimal konumu hesaplamadan deneysel olarak yerleştirerek ölçümler yapmıştır, elde edilen sonuçlara bakıldığında PEÜ'deki maksimum gerilim 3.6 V, maksimum güç ise 0.03 mW olarak bulunmuştur [10]. Balguvhar ve Bhalla'nın yaptığı çalışmada ise şehir içindeki bir üst geçidin altına PEÜ'yü optimal olmayan bir konuma deneysel olarak yerleştirmiştir ve maksimum gerilimin görüldüğü 4 Hz de PEÜ'den elde edilen gerilim 4 V, güç ise 0.20 μ W olmaktadır [40].



Şekil 5.30. PZT-4 malzemeli PEÜ'lerin 120 kN yük altındaki gerilim frekans değişimi.



Şekil 5.31. PZT-5A malzemeli PEÜ'lerin 120 kN yük altındaki gerilim frekans değişimi.



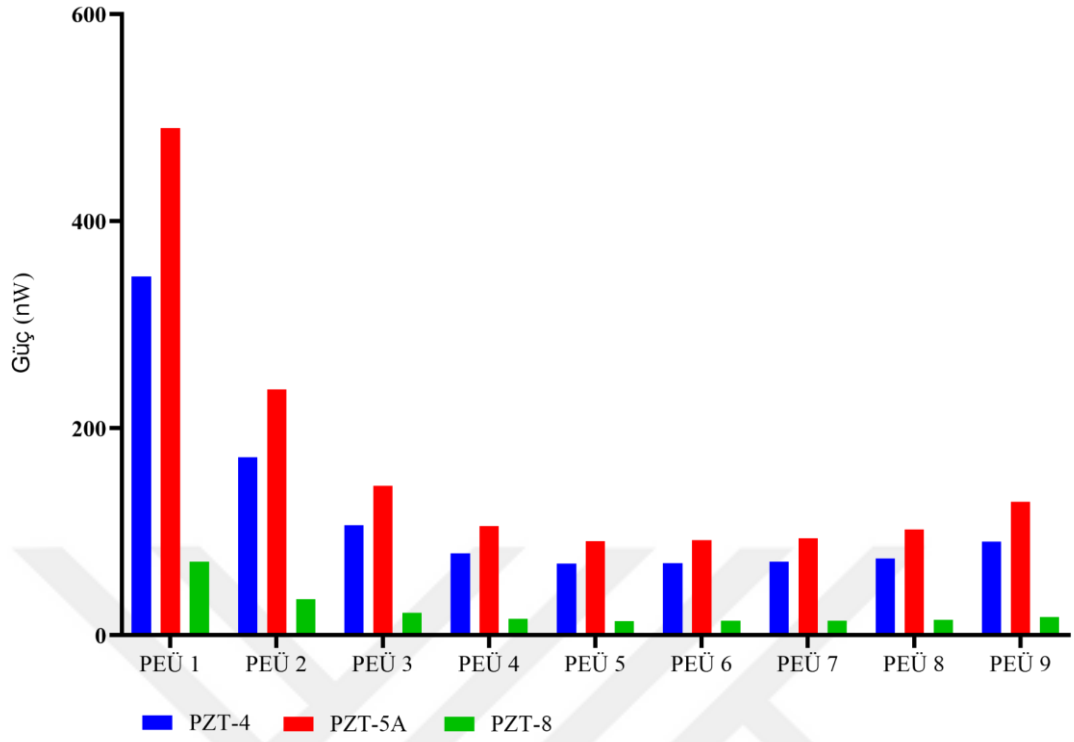
Şekil 5.32. PZT-8 malzemeli PEÜ'lerin 120 kN yük altındaki gerilim frekans değişimi.

Tablo 5.1. PEÜ'lerin ürettikleri maksimum gerilim değerleri (V).

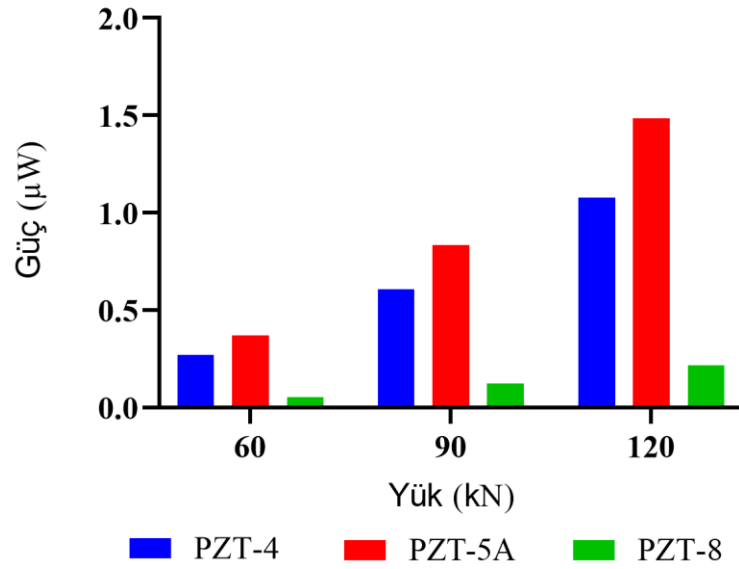
	PZT-4			PZT-5A			PZT-8		
	60 kN	90 kN	120 kN	60 kN	90 kN	120 kN	60 kN	90 kN	120 kN
PEÜ-1	2.9435	4.4152	5.8869	3.4992	5.2488	6.9984	1.3300	1.9950	2.6600
PEÜ-2	2.0732	3.1098	4.1463	2.4377	3.6566	4.8754	0.9343	1.4014	1.8686
PEÜ-3	1.6311	2.4467	3.2622	1.8987	2.8480	3.7973	0.7333	1.0999	1.4665
PEÜ-4	1.4060	2.1090	2.8120	1.6241	2.4362	3.2482	0.6309	0.9464	1.2618
PEÜ-5	1.3127	1.9690	2.6254	1.5054	2.2582	3.0109	0.5857	0.8785	1.1714
PEÜ-6	1.3203	1.9805	2.6406	1.5156	2.2734	3.0311	0.5889	0.8833	1.1778
PEÜ-7	1.3310	1.9966	2.6621	1.5296	2.2944	3.0592	0.5934	0.8901	1.1868
PEÜ-8	1.3627	2.0441	2.7254	1.5993	2.3989	3.1985	0.6083	0.9124	1.2165
PEÜ-9	1.5040	2.2560	3.0080	1.7951	2.6927	3.5902	0.6680	1.0021	1.3361

Tablo 5.2. PEÜ'lerin ürettikleri maksimum güç değerleri (nW).

	PZT-4			PZT-5A			PZT-8		
	60 kN	90 kN	120 kN	60 kN	90 kN	120 kN	60 kN	90 kN	120 kN
PEÜ-1	86.642	194.940	346.556	122.444	275.499	489.776	17.689	39.800	70.756
PEÜ-2	42.982	96.709	171.918	59.424	133.707	237.695	8.729	19.639	34.917
PEÜ-3	26.605	59.863	106.419	36.051	81.111	144.195	5.377	12.098	21.506
PEÜ-4	19.768	44.479	79.073	26.377	59.351	105.508	3.981	8.956	15.921
PEÜ-5	17.232	38.770	68.927	22.662	50.995	90.655	3.430	7.718	13.722
PEÜ-6	17.432	39.224	69.728	22.970	51.683	91.876	3.468	7.803	13.872
PEÜ-7	17.716	39.864	70.868	23.397	52.643	93.587	3.521	7.923	14.085
PEÜ-8	18.570	41.783	74.278	25.578	57.547	102.304	3.700	8.324	14.799
PEÜ-9	22.620	50.895	90.481	32.224	72.506	128.895	4.463	10.042	17.852
Toplam	269.566	606.527	1078.248	371.126	835.042	1484.491	54.357	122.304	217.429



Şekil 5.33. 120 kN yük altındaki PZT-5A Malzemeli PEÜ'lerden elde edilen maksimum güçlerin görünüşleri.



Şekil 5.34. PEÜ'lerden kazanılan maksimum toplam güç görünüşleri.

6. SONUÇLAR

Köprü yapılarıdaki araç geçişlerinden dolayı meydana gelen titreşim, PEÜ kullanılarak faydalı bir elektrik gücüne dönüştürülebilir. Bu çalışmada PEÜ'lerin Kuşsarayı-2 Köprüsü'ndeki optimal konumlarını bulunarak enerji kazanımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada üç farklı araç yükü ve üç farklı piezoelektrik malzeme kullanılarak köprü yapılarıdaki titreşimlerden enerji kazanımı elde edilmiştir. Kuşsarayı-2 Köprüsü'nün modal analizi çözümlenmiş ve doğal frekanslar; 3.7986, 4.0264, 5.0909, 5.3150, 8.3372 ve 9.7049 Hz'dir. En düşük doğal frekans (3.7986 Hz) değerinde elde edilen maksimum toplam deformasyon 0.0011662 m, en yüksek doğal frekans (9.7049 Hz) değerinde ise maksimum toplam deformasyon 0.0021247 m olarak hesaplanmıştır.

Enerji kazanımında kullanılacak olan PEÜ'lerin optimal yerleşiminin yapılabilmesi için harmonik analiz gerçekleştirilmiş ve elde edilen maksimum deformasyon miktarı 0.00091778 m, maksimum konumlar ise köprünün orta çizgisi olarak bulunmuştur. Piezoelektrikten enerji üretebilmek amacıyla köprüdeki kirişlerin altına monte edilmek üzere Bimorph yapıda PEÜ'leri tasarlanmıştır. Köprünün orta kısmında yol istikametine dikey şekilde her bir kirişin altına bir tane olarak monte edilen Bimorph yapıdaki toplam 9 adet PEÜ için PZT-4, PZT-5A ve PZT-8 olmak üzere üç farklı piezoelektrik malzeme kullanılmış ve sonuçların karşılaştırılabilmesi için üç farklı araç yükü (60 kN, 90 kN ve 120 kN) altında toplamda 13 farklı çözüm yapılmıştır. En fazla gerilimin olduğu PEÜ-1'de maksimum gerilim 7 V ve maksimum güç ise 0,49 μ W olarak hesaplanmıştır. Çözümlemeler sonucunda 8 araç yüküne denk olan 120 kN yük altındaki köprü yapıda PZT-8 malzemeli PEÜ'ler kullanıldığına toplam maksimum güç 0.217 μ W, PZT-4 malzemeli PEÜ'ler kullanıldığında toplam maksimum güç 1.078 μ W ve PZT-5A malzemeli PEÜ'ler kullanıldığına toplam maksimum güç 1.484 μ W olmaktadır. En fazla enerji kazanımının olduğu piezoelektrik malzemenin PZT-5A olduğu belirlenmiştir. Üretilen bu enerji miktarları literatür ile kıyaslandığında sonuçların ılımlı olduğu görülmüştür.

Elde edilen bu güç miktarı incelendiğinde, köprülerin yapısal sağlığını izlemede kullanılan kablosuz sensör sistemlerin daimi olarak çalışabilmesi için yeterli gelecek seviyenin yakalandığı gözlenmiştir. Titreşim ile enerji kazanımının güneş ve rüzgâr gibi enerji kaynakların aksine meteorolojik öğelerden bağımsız olduğu düşünüldüğünde bu sistemlerin yaygınlaştırılması ile mevcut sistemlerde oluşan atık pillerin de çevreye zararı önlenmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, Y., & Xue, X. (2018). Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers. *Sensors*, 18(12), 4312.
- [2] Gao, S., Dai, X., Liu, Z., Tian, G., & Yuan, S. (2015). A wireless piezoelectric sensor network for distributed structural health monitoring. In *2015 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [3] Jiao, P., Egbe, K. J. I., Xie, Y., Matin Nazar, A., & Alavi, A. H. (2020). Piezoelectric sensing techniques in structural health monitoring: A state-of-the-art review. *Sensors*, 20(13), 3730.
- [4] Hedaytullah, A. M. (2010). *Analysis of piezoelectric energy harvesting for bridge health monitoring systems*, PHD Thesis, University of Wales Swansea.
- [5] Nechibvute, A., Chawanda, A., & Luhanga, P. (2012). Piezoelectric energy harvesting devices: an alternative energy source for wireless sensors. *Smart Materials Research*.
- [6] Polat, A., & Bendine, K. (2020). Numerical modelling of piezoelectric based energy harvesting from the bridge structure. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 130-139.
- [7] Kouider, B., & Polat, A. (2020). Optimal position of piezoelectric actuators for active vibration reduction of beams. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 5(1), 385-392.
- [8] Erturk, A. (2011). Piezoelectric energy harvesting for civil infrastructure system applications: Moving loads and surface strain fluctuations. *Journal of Intelligent Material systems and structures*, 22(17), 1959-1973.
- [9] Bendine, K., Hamdaoui, M., & Boukhoulda, B. F. (2019). Piezoelectric energy harvesting from a bridge subjected to time-dependent moving loads using finite elements. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(6), 5743-5763.
- [10] Peigney, M., & Siegert, D. (2013). Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations. *Smart Materials and Structures*, 22(9), 095019.
- [11] Zhang, Z., Xiang, H., & Shi, Z. (2017). Mechanism exploration of piezoelectric energy harvesting from vibration in beams subjected to moving harmonic loads. *Composite Structures*, 179, 368-376.
- [12] Zhang, Y., Cai, S. C., & Deng, L. (2014). Piezoelectric-based energy harvesting in bridge systems. *Journal of intelligent material systems and structures*, 25(12), 1414-1428.
- [13] Anton, S. R., & Sodano, H. A. (2007). A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart materials and Structures*, 16(3), R1.
- [14] Jasim, A., Wang, H., Yesner, G., Safari, A., & Maher, A. (2017). Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway. *Energy*, 141, 1133-1145.
- [15] Wudy, F., Stock, C., & Gores, H. J. (2009) Measurement methods electrochemical: quartz microbalance. In: *Encyclopedia of electrochemical power sources*, vol 3. Elsevier, Oxford, UK, pp 660–672.
- [16] Dahiya, R. S., & Valle, M. (2013). Tactile sensing technologies. In *Robotic tactile sensing* (pp. 79-136). Springer, Dordrecht.
- [17] Qabur, A., & Alshammari, K. (2018). A systematic review of energy harvesting from roadways by using piezoelectric materials technology. *Innov. Energy Res*, 7, 1-6.

- [18] <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity>, Erişim: 10 Ocak 2022.
- [19] Uchino, K. (Ed.). (2017). *Advanced piezoelectric materials: Science and technology*. Woodhead Publishing.
- [20] Vinet, L., & Zhedanov, A. (2011). A ‘missing’ family of classical orthogonal polynomials. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8), 085201.
- [21] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kuvars>, Erişim: 15 Ocak 2022.
- [22] Waqar, S., Wang, L., & John, S. (2015). Piezoelectric energy harvesting from intelligent textiles. *In Electronic textiles* (pp. 173-197). Woodhead Publishing.
- [23] <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/pzt.html>, Erişim: 20 Ocak 2022.
- [24] <https://www.aemdeposition.com/oxide-targets/lead-zirconium-titanate-sputtering-targets.html>, Erişim: 20 Ocak 2022.
- [25] Pomeroy, M. (Ed.). (2021). *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. Elsevier.
- [26] <https://www.samaterials.com/content/barium-titanate-the-backbone-of-the-electronic-ceramic-industry.html>, Erişim: 25 Ocak 2022.
- [27] <https://www.firdavat.com/PVDF,PR-6132.html> Erişim: 28 Ocak 2022.
- [28] Holterman, J., & Groen, W. A. (2013). *An Introduction to piezoelectric materials and applications*. Stichting Applied Piezo.
- [29] Rastegar, J., & Dhadwal, H. S. (2016). *Energy Harvesting for Low-Power Autonomous Devices and Systems*. SPIE Press.
- [30] Waterbury, A. C. (2011). *Vibration harvesting using electromagnetic transduction*. University of California, Berkeley.
- [31] Mohanty, A., Parida, S., Behera, R. K., & Roy, T. (2019). Vibration energy harvesting: A review. *Journal of Advanced Dielectrics*, 9(04), 1930001.
- [32] <https://eurocodeapplied.com/design/en1992/concrete-design-properties>, Erişim: 5 Şubat 2022.
- [33] <https://courses.ansys.com/index.php/courses/modal-analysis/lessons/intro-to-modal-analysis-lesson-1>, Erişim: 13 Şubat 2022.
- [34] Chaphalkar, S. P., Khetre, S. N., & Meshram, A. M. (2015). Modal analysis of cantilever beam structure using finite element analysis and experimental analysis. *American journal of engineering research*, 4(10), 178-185.
- [35] https://simteq.co.za/wp-content/uploads/2017/11/modal-analysis_gerritvisser.pdf, Erişim: 15 Şubat 2022.
- [36] <https://courses.ansys.com/index.php/courses/harmonic-analysis-of-structures/lessons/intro-to-harmonic-analysis-lesson-1/>, Erişim: 17 Şubat 2022.
- [37] <https://simteq.co.za/blog/frequency-response-analysis/>, Erişim: 18 Şubat 2022.
- [38] <https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2019/05/3.6.2-Formulation-of-Harmonic-Analysis-New-Template.pdf>, Erişim: 20 Şubat 2022.
- [39] www.morgan-electroceramics.com, Erişim: 25 Şubat 2022.

- [40] Balgavhar, S., & Bhalla, S. (2018). Green energy harvesting using piezoelectric materials from bridge vibrations. In *2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)* (pp. 134-137). IEEE.



