

## MEMS Tabanlı Piezoelektrik Enerji Hasadı Sisteminin Tasarımı ve Analizi

Ümit Söylemez<sup>\*1</sup> ,

<sup>\*1</sup> Muş Rekabet Kurumu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Muş, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 01.02.2024, Kabul / Accepted: 04.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 26.04.2024)

### Anahtar Kelimeler

MEMS,  
Piezoelektrik,  
Sensör,  
Enerji hasadı

### ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) tabanlı düşük güçlü elektronik sensörlerin ve kablosuz sistemlerin enerji ihtiyacını karşılamak üzere geliştirilen enerji hasadı tekniklerine odaklanmaktadır. Özellikle, minyatür jeneratörlerin tasarımı ve performansını artırmaya yönelik bir perspektif sunulmuştur. Çalışma, ivme değişimlerinden elektrik enerjisi üretme kapasitesine sahip basit bir sismik enerji hasadının Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile detaylı bir şekilde incelenmesini amaçlamaktadır. Model, piezoelektrik özelliklere sahip bir MEMS sensörünü içermekte ve bu sensör, titreşimlere maruz kaldığında meydana gelen yerel ivme değişimlerini kullanarak elektrik enerjisi üretme yeteneğini değerlendirmektedir. Analiz edilen enerji hasadı sistemi, titreşen makineye bir uçta kelepçelenmiş bir piezoelektrik malzeme ve diğer uçta monta edilmiş bir denge kütle içermektedir. Bu tasarım, mekanik sisteme dayanmakta olup, model ile özelleştirilmiş bir şekilde sonlu elemanlar tekniği kullanılarak analizleri yapılmıştır. Analiz, sistemin geometrisi, malzeme özellikleri ve titreşim frekansları gibi faktörleri dikkate alarak enerji hasadı performansını optimize etmiştir. Bu çalışmada, tasarlanan sismik enerji toplayıcısının belirli titreşim koşullarında etkili bir şekilde elektrik enerjisi üretebildiğini göstermektedir. Bu analiz, MEMS tabanlı piezoelektrik enerji hasadı teknolojisinin geliştirilmesi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Çalışma, düşük enerjili sensörlerin ve kablosuz iletişim sistemlerinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yenilikçi ve etkili bir enerji kaynağı sağlama potansiyelini vurgulamaktadır.

## Design and Analysis of MEMS Based Piezoelectric Energy Harvesting System

### Keywords

MEMS,  
Piezoelectric,  
Sensors,  
Energy harvesting

### ABSTRACT

The main objective of this study is to focus on energy harvesting techniques developed to meet the energy demand of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)-based low-power electronic sensors and wireless systems. Particularly, a perspective is presented towards enhancing the design and performance of miniature generators. The study aims to comprehensively examine a simple seismic energy harvesting, capable of generating electrical energy from acceleration changes, through Finite Element Analysis (FEA). The model incorporates a MEMS sensor with piezoelectric properties, evaluating its ability to produce electrical energy by utilizing local acceleration changes induced by vibrations. The analyzed energy harvesting system comprises a piezoelectric material clamped to one end of the vibrating structure and a balancing mass mounted at the other end. This design relies on mechanical motion and has been analyzed using a customized finite element technique. The analysis optimizes energy harvesting performance by considering factors such as system geometry, material properties, and vibration frequencies. This study demonstrates that the designed seismic energy harvester can effectively generate electrical energy under specific vibration conditions. This analysis can be considered a significant step towards the development of MEMS-based piezoelectric energy harvesting technology. The study underscores the potential to provide an innovative and efficient energy source to meet the energy demands of low-power sensors and wireless communication systems.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: u.sylmz@gmail.com

Cilt / Volume: 1

Sayı / Issue: 1

Atıf Formatı / Cite as: Söylemez, Ü., "MEMS Tabanlı Piezoelektrik Enerji Hasadı Sisteminin Tasarımı ve Analizi", Hendese, Cilt 1, Sayı 1, Sayfa 46-49, 2024.

Doi: 10.5281/zenodo.11068975

## 1. GİRİŞ

“Piezo” kelimesi Yunanca kökenli olup, sıkıştırmak veya basınç uygulamak anlamına gelir. Piezoelektrik özelliği, bir malzemenin mekanik basınç altında alanını değiştirebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Polarizasyon yoğunluğu, uygulanan basınca ve malzemenin büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Piezoelektrik malzemeler, terslenebilir bir yapıya sahip olduklarından dolayı ses oluşturma, algılama, voltaj oluşturma gibi birçok uygulama alanında kullanılabilir [1].

İnsanoğlu, ihtiyaçlarını karşılamak adına sürekli olarak yeni malzemelerin peşine düşmüştür. Metal, seramik, sentetik, plastik, kompozit, elektronik ve hatta beyin ve sinir sistemi gibi dinamik akıllı malzemeler ile birlikte, nano teknolojik malzemeler ve yapay zekâ temelli malzemeler zaman içinde bulunmuştur. Bu çeşitlenme, mühendislik bilimini sürekli olarak evrimleştirmiştir. Akıllı malzemeler, çevrelerindeki değişiklikleri algılayabilen, sinyal üretebilen ve bu sinyallere aktüatörler aracılığıyla tepki verebilen sistemlerdir. Bu özellikleri, canlı organizmaların çevreleriyle etkileşime girebilme ve uygun tepkiler üretebilme kabiliyetine benzer bir özelliği ortaya koyar [2].

Piezoelektrik malzemelerin mekanik enerjiiyi elektrik enerjisine dönüştürme kavramı da tarihi bir geçmişe sahiptir, ancak pratikte bu tür elektrik üreteçleri genellikle mili vat düzeyinde veya daha düşük, yani oldukça düşük güç seviyeleriyle sınırlıdır. Bu sınırlama, piezoelektrik seramiklerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu seramikler, büyük gerilimlere dayanıklılık gösterir, ancak deformasyonları son derece sınırlıdır, bu da büyük miktarlarda malzemenin kullanılmasını zorlaştırır. Ek olarak, bu malzemelerin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için gereken yüksek mekanik frekanslar da kritik bir faktördür. Genellikle çevresel mekanik titreşimler 0.1 Hz ile 1 kHz arasında değişirken, piezoelektrik malzemeler genellikle yüksek frekansta, yüzlerce kilohertze kadar çalışabilir. Bu durum, piezoelektrik enerji dönüşümünün yaygın uygulamalarda sınırlı kalmasının temel nedenlerinden biridir [3].

Piezoelektrik malzemelerin çeşitli sektörlerdeki kullanımının hızlı artması, bu malzemelerin daha geniş bir perspektifle incelenmesi ve araştırılmasına olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Piezoelektrik özelliklere sahip malzemeler, mekanik stres veya basınç altında elektriksel enerji üretebilen özel bir özellik sergilerler. Bu özellikleri, sensör teknolojisi, tıp, enerji üretimi, akustik uygulamalar ve mikroelektronik gibi birçok alanda çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır [4-6].

Özellikle, piezoelektrik malzemelerin mikroelektronik cihazlar, sağlık sektörü cihazları ve akustik sensörler gibi teknolojik alanlarda kullanımı, bu malzemelerin potansiyelini daha da genişletmiştir. Bu nedenle, piezoelektrik malzemelerin performansını ve özelliklerini daha iyi anlamak, tasarım ve üretim süreçlerini geliştirmek için daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin çeşitli koşullarda nasıl tepki verdiği, dayanıklılığı ve etkinliği gibi faktörlerin daha detaylı bir şekilde değerlendirilmesi, gelecekteki uygulamalarda daha güvenilir ve optimize edilmiş çözümler geliştirmeye yönelik önemli bir adımdır. Bu bağlamda, piezoelektrik malzemelerin geniş kapsamlı araştırmalarla daha iyi anlaşılması, gelecekteki teknolojik ve bilimsel ilerlemeleri destekleme adına hayati bir rol oynamaktadır [7,8].

Düşük enerji tüketimine sahip elektronik cihazlar ve kablosuz sistemlerin geliştirilmesi, enerji toplama alanında büyük bir çığır açmıştır. Minyatür jeneratörlerin geliştirilmesine olan yoğun ilgi, özellikle bu cihazların sensörleri ve kablosuz iletişim sistemlerini güçlendirmek üzere kullanılmasına odaklanmış durumda. Ekonomik ve kendi başına çalışabilen kablosuz sensörlerin hızla yayılması mümkün hale gelmiş bulunmaktadır. Bu sensörler, genellikle uzun bir süre boyunca aralıklı ölçümler yapar ve bu ölçümleri diğer sensörlere ileterek, nihayetinde tüm sensörlerden gelen verileri kaydeden bir ana istasyona kablosuz bir bağlantı üzerinden iletilir. Yani, ortaya çıkan bir kablosuz sensör ağı, verimli bir bilgi akışını mümkün kılmaktadır [9,10].

Son yıllarda, titreşim enerjisini toplamak ve hasat etmek amacıyla piezoelektrik malzemelerin kullanımı üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Çok katmanlı konsol piezoelektrik güç üretim cihazlarının güç üretim kapasitesi, sonlu elemanlar modeli analizi kullanılarak incelendi. Cihazın güç üretim performansı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla harici uyarım frekansı ve genliği üzerinde yapılan analizler detaylı bir şekilde ele alındı. Bu analizler, piezoelektrik enerji dönüşümünün optimize edilmesi için önemli bilgiler sunabilir [11]. Piezoelektrik malzemelerin düşük frekanslı titreşim ortamlarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini gösterildi [12]. Titreşim koşulları altında piezoelektrik malzemelerin kuvvet-elektrik eşdeğer modelini detaylı bir şekilde analiz ederek, bu malzemelerin düzensiz titreşim ortamlarında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koyup, elde edilen bulgularla, piezoelektrik malzemelerin enerji toplama potansiyeli açısından geniş bir uygulama yelpazesi sunabildiği, özellikle de değişken titreşim ortamlarına yönelik çözümlerde önemli bir rol oynayabildiği kanıtlandı [13]. Rüzgâr enerjisiyle çalışan ince film piezoelektrik enerji toplayıcılarının araştırılması hem paralel hem de ağı damarlanma yanı sıra damarsız damarlanma için de yapıldı ve elde edilen bulgular rapor edildi. Yapılan araştırma, piezoelektrik enerji toplayıcılarının çeşitli damarlama yöntemleriyle güçlendirilebileceğini ve farklı ortamlardaki enerji toplama potansiyelini artırabileceğini yapılan çalışmalar bizlere gösterdi [14].

Literatür araştırmalardan da anlaşılacağı üzere piezoelektrik enerji toplama konusu üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Piezoelektrik enerji toplayıcının çıkış gücünü optimize etmek ve daha etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için çeşitli stratejiler ve geliştirmeler uygulanmıştır [15].

Birçok araştırmacı, piezoelektrik enerji hasatlayıcı modellerini simüle etmek amacıyla Sonlu Elemanlar Analiz Programı' kullanarak çıkış gücünü artırmak için uyarım frekansı, ivme, piezoelektrik katmanların kalınlığı, boşluklar gibi çeşitli parametreleri detaylı bir şekilde inceledi. Bu simülasyonlar, piezoelektrik enerji toplama teknolojisinin geliştirilmesi için önemli bilgiler sağlamıştır [16].

Bu özgün enerji hasadı modeli, tasarımında piezoelektrik bimorph'un titreşen makineye bağlandığı bir yapıyı ve diğer ucu üzerinde bir kütle bulunan bir düzenlemeyi içermektedir. Bu karmaşık düzenleme, piezoelektrik malzemelerin titreşim kaynaklı enerji hasat etme kabiliyetini değerlendirmek amacıyla detaylı bir analize tabi tutulmuştur. Yapılan bu analiz, sistemdeki mekanik etkileşimleri, enerji transferini ve piezoelektrik bileşenlerin performansını daha kapsamlı bir

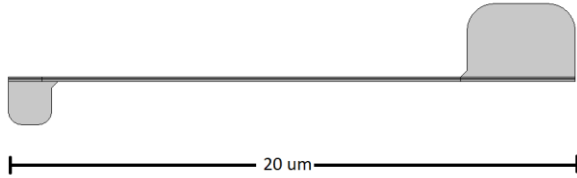
şekilde anlamak için tasarlanmıştır. Bu çalışmanın, enerji hasadı teknolojilerindeki gelişmelere yeni bir bakış açısı sunacağı düşünülmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOD

Sonlu Elemanlar Analiz (SEA) yapılabilmesi için uygun materyal metot seçimi ve geometrik tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Sensörün geometrik yapısı, malzeme kalitesi ve sensörün kullanılacağı ortamın özellikleri, tasarım sürecinde kritik parametreler olarak ele alınmıştır. Sensörün boyutları, şekli ve yapısal özellikleri, enerji hasadı verimliliğini etkileyen kritik unsurlardır. Tasarım sürecinde kullanılacak geometrik parametreler özenle belirlenmiştir. Piezoelektrik malzemelerin seçimi, sensörün performansını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Sensörün mekanik dayanıklılığı, hızlı tepki süreleri ve piezoelektrik etkinliği açısından uygun malzeme seçimi büyük önem taşımaktadır.

### 2.1. Geometrik Tasarım

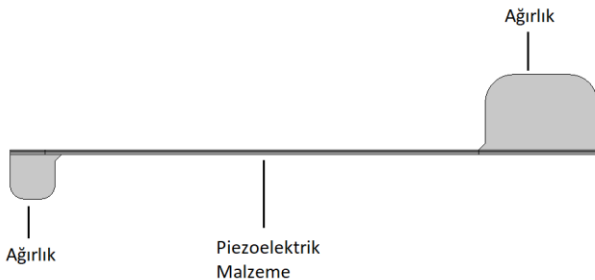
Sonlu Elemanlar Analiz Programı kullanarak sensörün fiziksel yapısı modellenmiş olup ve sensör performansını optimize etmek üzere çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sistemin optimum geometrik tasarımının elde edilebilmesi için birçok analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre Şekil 1' deki tasarım elde edilmiştir. Sistemin geometrik tasarımı MEMS yapılarına uygun bir şekilde yapılmış olup, bu örnek tasarım 20 mikron uzunluğuna sahiptir.



Şekil 1. Sistemin geometrik yapısı

### 2.2. Malzeme Optimizasyonu

Sensör tasarımı yapıldıktan sonra ilk adım, uygun malzeme seçimidir. Sonlu Elemanlar Analiz Programı uygulaması kullanılarak sensörün fiziksel geometrisi modellendikten sonra sensörün çalışma prensipleri de göz önünde bulundurularak malzeme çalışma için uygun malzeme ataması yapılmıştır. Şekil 2' de sistemde malzeme ataması yapılan parçalar gösterilmiştir. Şekil 2' de gösterilen Ağırlık yapılarında Alüminyum malzeme, Piezoelektrik malzeme olarak kullanılan çubukta ise Lityum Niyobat kullanılmıştır. Çizelge 1 ve 2' de sistemde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. Sistemin malzeme yapısı gösterimi [11-13].

Çizelge 1. Alüminyum fiziksel özellikleri [11].

Alüminyum	Değer	Birim
Yoğunluk	2700	kg/m <sup>3</sup>
Youngs Modülü	70*10 <sup>9</sup>	Pa
Poisson Oranı	0.35	1
Elektrik iletkenliği	35.5*10 <sup>6</sup>	S/m
Termal iletkenlik	237	W/(m*K)

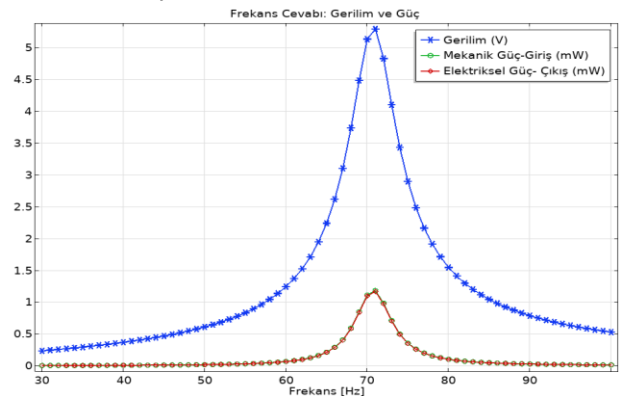
Çizelge 2. Lityum Niyobat fiziksel özellikleri [11-13]

Lityum Niyobat	Değer	Birim
Yoğunluk	4700	kg/m <sup>3</sup>
Bağıl Geçirgenlik	43.6	1
Dielektrik Sabiti	1450	1
Poisson Oranı	0.31	1
Piezoelektrik Gerinimi	13.1	C/m <sup>2</sup>

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

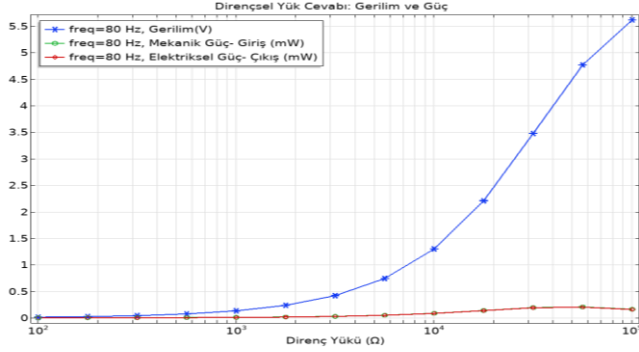
Elde edilen bulgulara dayanarak, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin MEMS yapıları için etkili bir şekilde çalışabildiği belirtilmektedir. Özellikle, çalışmanın sonuçları, malzeme seçiminin enerji verimliliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Bu, literatüre, belirli malzemelerin enerji hasadı verimliliği üzerindeki etkisini değerlendiren sayısal verilerle katkı sağlar. Ayrıca, özgün tasarıma sahip piezoelektrik enerji hasadı sisteminin avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. Bu, mevcut literatürde sıkça görülen genel değerlendirmelerin ötesine geçerek, spesifik bir tasarımın performansını ve potansiyel kısıtlamalarını açıklayan nicel verilere dayalı bir analiz sunar. Şekil 3'te, piezoelektrik enerji toplama cihazlarının MEMS yapılarında etkili bir şekilde çalışabildiği gösterilmiştir. Çalışmada, sisteme 30 Hz ile 100 Hz frekansları arasında çeşitli frekanslar verilmiştir. Bu frekans değerlerine göre elde edilen gerilim değerleri de Şekil 3'te grafikleştirilmiştir. Bu grafik, mikro yapılar için enerji hasadı sisteminin verimli bir şekilde işlev görebildiğini sayısal olarak kanıtlar.

Çalışmadaki veriler incelendiğinde, sistemden elde edilen elektriksel gücün yaklaşık olarak 1.2 mW olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayısal değer, literatüre, belirli bir tasarımın pratik uygulanabilirliği ve performansı hakkında kesin bir fikir verir ve benzer çalışmalara karşı bir referans noktası sağlar. Bu, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin MEMS yapıları için potansiyel uygulamalarını daha net bir şekilde anlamamızı sağlayıp ilgili alanda gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturmaktadır.



### Şekil 3. Piezoelektrik enerji toplama sisteminin Frekans Cevabı

Şekil 4' te sistemin Direnç Yükü cevabı verilmiştir. Sisteme belirli aralıklarla verilen Direnç Yüküne karşılık olarak elde edilen maksimum gerilim değeri yaklaşık olarak 5.6 V olarak elde edilmiştir. Sistemden elde edilen gerilim ve güç değerleri ortalama olarak 80 Hz frekans değerinde elde edilmiştir.



Şekil 4. Piezoelektrik enerji toplama sisteminin Direnç Yükü Cevabı

## 4. SONUÇLAR

Bu araştırma, günümüzün hızla gelişen teknoloji sahnesinde önemli bir yere sahip olan piezoelektrik enerji toplayıcılarına odaklanmaktadır. Özellikle, yüksek teknoloji ürünü bir sensöre entegre edilen ve Sonlu Elemanlar Analiz Programı kullanılarak tasarlanan piezoelektrik enerji toplayıcılarının performansı üzerine yapılan detaylı bir çalışmayı içermektedir. Bu çalışma, piezoelektrik enerji toplayıcılarının malzeme seçimi, tasarımı ve analizi gibi kritik unsurlarını kapsamaktadır ve MEMS tabanlı yapıların piezoelektrik enerji hasadı teknolojisindeki potansiyelini açığa çıkarmaktadır. Ayrıca, bu araştırma yalnızca teknik detaylarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda piezoelektrik enerji toplayıcılarının enerji verimliliği ve çevresel etkilere olan etkilerini de detaylı bir şekilde ele almaktadır. Mikro sistemlerde piezoelektrik enerji hasadı konseptinin geniş bir perspektifini sunarak, bu teknolojinin taşınabilir cihazlar ve düşük enerji tüketimine sahip mikro sistemler için önemli bir çözüm olabileceğini vurgulamaktadır. Böylece, sadece teknolojik açıdan değil, aynı zamanda çevresel ve enerji verimliliği açısından da büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu araştırma, MEMS teknolojisindeki piezoelektrik enerji hasadının potansiyelini kapsamlı bir şekilde derinlemesine değerlendirerek, gelecekteki araştırmacılara ilham kaynağı olabilecek nitelikte bir çalışma sunmaktadır. Piezoelektrik enerji toplayıcıları, günümüzün enerji ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir rol oynayabilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişte kilit bir faktör olabilir. Bu nedenle, bu alandaki araştırmaların önemi ve etkisi giderek artmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Gök, M. O., Karadöl, İ., "Piezoelektrik Uygulamalı Ayakkabı Tasarımı", International Journal Of Social And Humanities Sciences Research (Jshsr), Cilt 5, Sayı 22, Sayfa 888-893, 2018
- [2] Akgün, M., "Piezoelektrik özellikli, polimer nano kompozit malzeme geliştirilmesi ve titreşim sensörü olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi", Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Bursa, 2018.

- [3] Lefeuvre, E., Audigier, D., Richard, C., Guyomar, D., "Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, Issue 5, Sayfa 2018-2025, 2007.
- [4] Ulkir, O., Ertugrul, I., Akkus, N., Ozer, S., "Production of the piezoelectric cantilever using MEMS-based layered manufacturing technology", Optik, 170472, 2023.
- [5] Ertugrul, I., Ulkir, O., Ersoy, S., Ragulskis, M., "Additive Manufactured Strain Sensor Using Stereolithography Method with Photopolymer Material", Polymers, Vol. 15, Issue 4, Pages 991-998, 2023.
- [6] Angelou, A., Norman, C., Miran, N., Albers, S., Moradi-Dastjerdi, R., Behdinin, K., "An eco-friendly, biocompatible, and reliable piezoelectric nanocomposite actuator for the new generation of microelectronic devices", The European Physical Journal Plus, Vol. 136, Issue 6, Pages 1-17, 2021.
- [7] Sekhar, M. C., Veena, E., Kumar, N. S., Naidu, K. C. B., Mallikarjuna, A., Basha, D. B., "A review on piezoelectric materials and their applications", Crystal Research and Technology, Vol. 58, Issue 2, Pages 2200130, 2023.
- [8] Ertugrul, I., Ersoy, S., Ragulskis, M., "Computational model for the nonlinear dynamic response of MEMS-based micromirror", In Vibroengineering procedia: 58th international conference on vibroengineering, Ventspils, Latvia, August 25-26, 2022.
- [9] Kumar, A., Prasad, M., Janyani, V., Yadav, R. P., "Development of diaphragm and microtunnel structures for MEMS piezoelectric sensors", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 33, Issue 4, Pages 606-613, 2020.
- [10] Ertugrul, I., Akkus, N., Yuca, H., "Fabrication Of Mems-Based Electrothermal Microactuators With Additive Manufacturing Technologies", Materials & Technologies/Materiali in Tehnologije, Vol. 53, Issue 5, Pages 665-670, 2019.
- [11] Junjie, G., Zhilin, R., Kangchao, L., Yixiang, B.J., "Study on the generating performance of a novel piezoelectric generator with multilayer cantilevers", Journal of Mechanical Engineering, Vol. 50, Issue 5, Pages 135-140, 2014.
- [12] Rastegar, J., Pereira, C., Nguyen, H.L., "Piezoelectric-based power sources for harvesting energy from platforms with low-frequency vibration, Smart Structures and Materials", Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, SPIE, 617101, 2006.
- [13] Wang, Q., "Research of Vibration Energy Harvesting Based on Piezoelectric Material", Doctoral dissertation, Jiangsu University Zhenjiang, China, 2008.
- [14] Varadha, E., Kumar, S.R., Jain, X.A., "Wind-Driven Leaf-Like Thin-Film Piezoelectric Harvester for Low Wind Applications", Journal of Vibration Engineering & Technologies, Vol. 9, Pages 1005-10221, 2021.
- [15] Song, J., Zhao, G., Li, B., Wang, J., "Design optimization of PVDF-based piezoelectric energy harvesters", Heliyon, Vol. 3, Issue 9, 2017.
- [16] Jasim, A., Yesner, G., Wang, H., Safari, A., Maher, A., Basily, B., "Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications", Applied Energy, Vol. 224, Pages 438-447, 2018.