

Enerji Hasadında Piezoelektrik Yaklaşımlar: Malzeme Özellikleri ve Sensör Teknolojileri

Sibel Akkaya Oy¹

Ali ekber Özdemir²

Özet

Piezoelektrik etki, bazı kristal ve polimer yapıdaki malzemelerin mekanik gerilme altında elektriksel yük üretmesi prensibine dayanmakta olup, enerji toplama sistemlerinde pasif, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji dönüşüm yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda piezoelektrik sensörler, çevreden gelen titreşim, darbe ve basınç gibi mekanik uyarımları elektrik enerjisine dönüştürerek mikro enerji hasadı uygulamalarında kritik rol oynamaktadır. Enerji hasatlayıcı sistemlerde kullanılan piezosensörler; yapısal tasarımlarına göre çeşitlilik göstermektedir. Tek katmanlı (unimorph) ve iki katmanlı (bimorph) sensörler, bir veya iki piezoelektrik tabakanın metal ya da esnek bir taşıyıcı üzerine yerleştirilmesiyle elde edilmekte ve yüksek hassasiyetle eğilme modunda çalışmaktadır. İnce film (thin film) piezoelektrikler, mikroeletro mekanik sistemlerde (MEMS) kullanıma uygun olup, düşük profilli yapıları sayesinde entegre sistemlerde avantaj sağlamaktadır. Yığın (stacked) piezoelektrik sensörler, yüksek enerji yoğunluğu sağlayan çok katmanlı yapılarıyla dikkat çekmektedir. Eğilme (flexural) ve tek uçlu kiriş (cantilever) piezoelektrik sensörler, özellikle titreşimli ortamlarda maksimum yer değiştirme elde edilerek enerji dönüşüm verimliliğini artırmaktadır. Son olarak, küresel (spherical) piezoelektrik yapılar, çok yönlü mekanik uyarılara duyarlı olmaları nedeniyle özellikle düzensiz titreşim kaynaklarından enerji toplama uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu bölümde söz konusu piezoelektrik sensör tipleri yapısal özellikleri, malzeme türleri ve enerji hasadı verimlilikleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

- 1 Doç. Dr., Ordu Üniversitesi, Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği, sibelakkaya@odu.edu.tr, 0000-0002-1209-920X
- 2 Doç. Dr., Ordu Üniversitesi, Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği, a.ekber@odu.edu.tr, 0000-0002-4186-6244

1. Piezoelektrik Malzemeler ve Sensör Teknolojilerindeki Uygulama Prensipleri

Piezoelektrik materyaller, mekanik stres altında elektriksel yük üretebilen özel malzemeler olup, bu özellikleri sayesinde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Elektriksel ve mekanik özelliklerinin etkileşimi, bu materyallerin sensör teknolojileri ve diğer algılama sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu bölümde, piezoelektrik materyallerin yapısal özellikleri ve fiziksel davranışları detaylı bir şekilde incelenecek; ayrıca piezoelektrik sensörlerin çalışma durumları, bu sensörlerin çevresel faktörlere ve mekanik etkilerle nasıl tepki verdiklerini açıklamak amacıyla ele alınacaktır.

1.1. Piezoelektrik materyaller ve özellikleri

Bazı malzemeler üzerlerine uygulanan mekanik zorlanmanın sonucu yüzeylerinde elektrik yükleri üretirler. Oluşan bu yüklerin miktarı uygulanan mekanik zorlanma ile orantılıdır [1,2]. Bu etkiye doğrudan veya direkt Piezoelektrik etki denir. Piezoelektrik etki, ilk olarak Jacques ve Pierre Curie kardeşler tarafından kristal fiziği araştırma alanı kapsamında incelenmeye başlanmıştır. Aslında ilk keşfedilen etki, doğrudan piezoelektrik etki olmuştur. Doğrudan etkinin keşfedilmesinden bir yıl sonra, Gabriel Lippmann temel termodinamik ilkeleri temel alarak ters (konvers) etkinin varlığını öngörmüştür. 1881 yılı sona ermeden önce, Curie kardeşler ters etkinin varlığını deneysel olarak doğrulamışlardır [3]. Bu tersinir etki, ters piezoelektrik etki (konvers piezoelektrik etki) olarak adlandırılır [4].

Piezoelektrik malzemelerin değerlendirilmesinde 5 önemli sayısal değer (figure of merit) vardır. Bunlar aşağıdaki tablo ile gösterilmiştir.

Tablo 1. Piezoelektrik malzeme sayısal değerler

Büyükliğin ismi	Sembolü
Piezoelektrik gerilme sabiti	d
Piezoelektrik gerilim sabiti	g
Elektromekanik bağlantı faktörü	k ve ya k^2
Mekanik kalite faktörü	Q_M
Akustik empedans	Z

1- Piezoelektrik gerilme sabiti: Harici bir elektrik alan (E) tarafından uyarılmış gerginliğin/zorlanmanın (x) genliği olarak tanımlanabilen bu büyüklük özellikle aktüatör uygulamaları için önemli bir büyüklüktür [5].

$$d = \frac{x}{E} \quad (1)$$

2- Piezoelektrik gerilim (Voltaj) sabiti: Özellikle algılayıcı uygulamaları için önemli olan bu büyüklük, Harici bir gerginlik/zorlanma tarafından uyarılan elektrik alanın genliği olarak tanımlanabilir [6].

$$g = \frac{E}{X} \quad (2)$$

Piezoelektrik gerilme sabiti ve Piezoelektrik gerilim sabiti arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlik ile gösterilmiştir.

$$g = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (3)$$

(ϵ_0 mutlak dielektrik sabiti, ϵ bağlı dielektrik sabiti)

3- Elektromekanik bağlantı faktörü: Elektromekanik bağlantı faktörü (k^2), Enerji iletim katsayısı (λ_{max}) ve verimlilik (η) bazen karıştırılır. Bunun nedeni, bu terimlerin hepsinin, elektrik enerjisi ile mekanik enerji arasındaki dönüşüm oranı ile ilgili olmasına rağmen tanımlarının farklı olmasıdır. Bu nedenle bu alt bölüm başlığı altında bu terimlerin tamamı açıklanacaktır. Bununla birlikte yapılan tanımlamalar söz konusu Piezoelektrik etkinin doğrudan veya ters Piezoelektrik etki olmasına göre değişir [7,8,9]. Örneğin söz konusu etki doğrudan Piezoelektrik etki ise elektromekanik bağlantı faktörü;

$$k^2 = \frac{\text{Biriktirilen elektrik enerjisi}}{\text{Mekanik enerji girişi}} \quad (4)$$

İken, söz konusu ters Piezoelektrik etki ise

$$k^2 = \frac{\text{Biriktirilen mekanik enerji}}{\text{Elektrik enerji girişi}} \quad (5)$$

olarak tanımlanır.

(a) Elektromekanik bağlantı faktörü (k^2):

Söz konusu etkinin ters Piezoelektrik etki olduğu düşünüldüğünde (eşitlik 5 referans alındığında) yani Piezoelektrik malzemeye bir E elektrik alanı uygulandığında, birim hacim başına uygulanan giriş elektrik enerjisi [10, 11];

$$J_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (6)$$

Formülü ile ifade edilir. Bu durumda, Piezoelektrik malzemeye dışarıdan harici bir gerilim uygulanmıyorsa, malzeme üzerinde biriktirilen mekanik enerji;

$$J_M = \frac{1}{2} x^2 \quad (7)$$

Eşitlik 1 deki x değeri eşitlik 7 de yerine konulursa,

$$J_M = \frac{1}{2s} (Ed)^2 \quad (8)$$

Sonuç olarak;

$$k^2 = \frac{\frac{1}{2s} (Ed)^2}{\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2} \quad (9)$$

Eşitlik 9 düzenlenirse;

$$k^2 = \frac{d^2}{\epsilon_0 \epsilon s} \quad (10)$$

Olarak hesaplanır. (formüldeki s Piezoelektrik uyum olarak tanımlanan bir büyüklüktür).

(b) Enerji iletim katsayısı (λ_{max}):

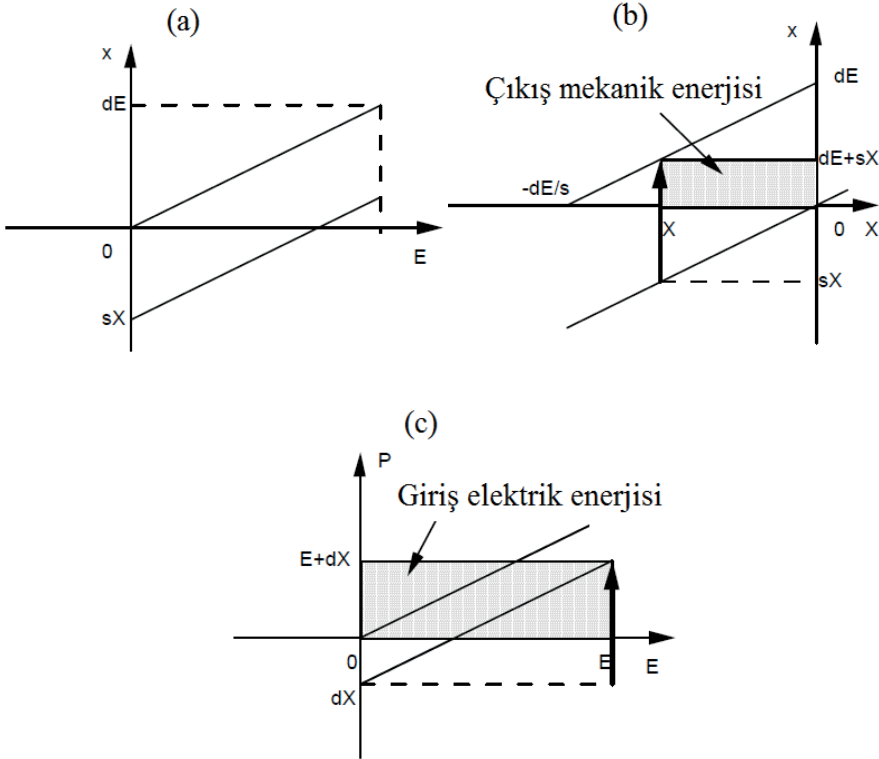
Aslında depolanan enerjinin tamamı kullanılmaz ve yapılan iş de mekanik yüke bağlıdır. Bu katsayı biriktirilen değil, giriş ve çıkış enerjileri ile ilgilidir. Elektromekanik bağlantı faktöründe olduğu gibi direkt Piezoelektrik etkide enerji iletim katsayısı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [12].

$$\lambda_{max} = \frac{\text{Çıkış elektrik enerjisi}}{\text{Giriş mekanik enerjisi}} \quad (11)$$

Ters Piezoelektrik etki için ise,

$$\lambda_{max} = \frac{\text{Çıkış mekanik enerjisi}}{\text{Giriş elektrik enerjisi}} \quad (12)$$

Enerji iletim katsayısı için aşağıda verilen grafik önemlidir.



Şekil -1 Giriş elektrik enerjisi ve çıkış mekanik enerjisinin hesabı

(a) Elektrik alana karşı biçim bozulması (b) Gerilmeye karşı biçim bozulması (c) Elektrik alana karşı polarizasyon

Sonuç olarak $\frac{k^2}{4} < \lambda_{max} < \frac{k^2}{2}$ olduğu görülecektir.

(c) Verimlilik (η):

Direkt veya ters Piezoelektrik etkiye bağlı olarak, çıkış mekanik ve ya elektrik enerjisinin tüketilen mekanik ve ya elektrik enerjisine oranı olarak ifade edilir.

1- Mekanik kalite faktörü:

Mekanik kalite faktörü Q_M elektromekanik rezonans spektrumunu karakterize eden bir parametredir (w_0 frekansı) [13].

$$Q_M = \frac{w_0}{2\Delta w} \quad (13)$$

Bununla birlikte Q_M^{-1} mekanik kayba eşittir.

2- Akustik empedans

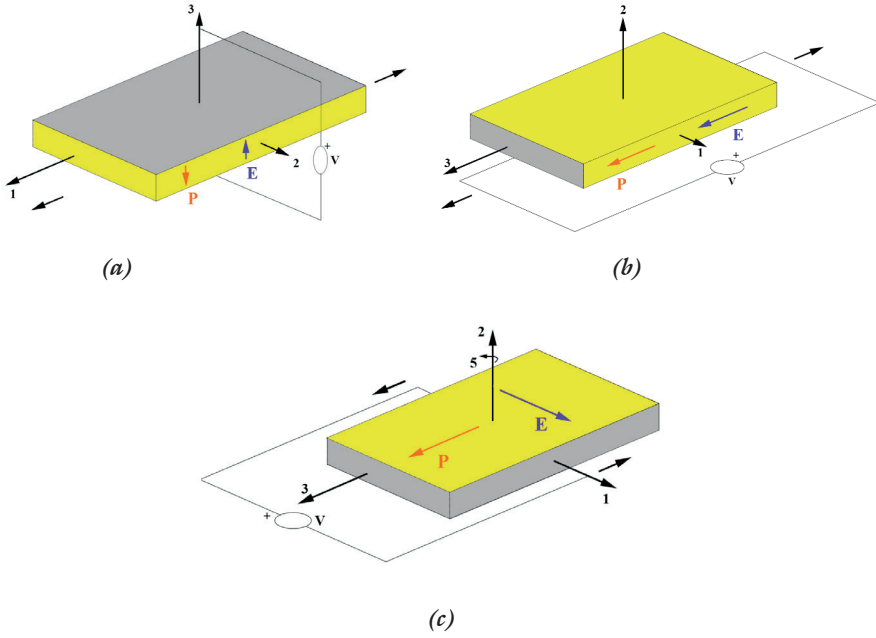
Akustik empedans iki malzeme arasındaki akustik enerji aktarımını karakterize eden bir parametredir [14].

$$Z = \sqrt{\rho c} \quad (14)$$

Verilen ifadede ρ değeri yoğunluğu, c ise malzemenin elastik sertliğini temsil etmektedir.

1.2. Piezoelektrik Sensörün Çalışma Durumları

Piezoelektrik sensörler, uygulanan mekanik gerilime bağlı olarak elektrik yükü üreten malzemelerdir ve bu dönüşüm süreci çeşitli çalışma modlarında gerçekleşebilir. Bu durum doğrudan Piezoelektrik etki altında d_{ij} terimi ile ifade edilir (dolaylı Piezoelektrik etki için ise s_{ij} terimi terimi kullanılır). Bu d_{ij} terimindeki i alt simgesi uyarılma yönünü, j ise ve sistem yanıtını göstermektedir. Bu çalışma modları, piezoelektrik sensörlerin tasarımında belirleyici olup, kullanılacak uygulamaya göre sensör malzemesinin yönlendirilmesi ve yerleşimi bu doğrultuda optimize edilir.



Şekil-2 Çalışma durumları

Şekil 2, PZT seramikleri durumunda farklı birincil elektromekanik kuplajı gösterir [15]. Deformasyon modları uzunlamasına (boyuna) mod (“33”), enine mod (“31”) ve kayma (kesme) modu (“15”) olarak adlandırılır [16,17].

Şekil 2 (a) daki boyuna moddaki mekanik gerilme ve elektriksel kutuplaşma (polarizasyon) aynı yöndedir. Piezoelektrik malzeme, polarizasyon yönünde (genellikle z-ekseni) sıkıştırılır ya da çekilir. Bu mod yüksek çıkış sinyali üretme kapasitesi nedeniyle enerji hasatlama sistemlerinde sıklıkla tercih edilir.

Şekil 2 (b) deki enine moddaki mekanik kuvvet, polarizasyon yönüne dik olarak uygulanır. Malzemenin deformasyonu polarizasyon eksenine dik bir düzlemde gerçekleşir. Cantilever kirişler gibi eğilme yapıları bu modla çalışır. Üretilen elektrik alan, genellikle uygulanan kuvvet eksenine dik yönde olur.

Şekil 2 (c) deki kayma modu ise piezoelektrik malzemenin yüzeyine paralel uygulanan kuvvetlerle çalışır. Malzeme, kristal düzlemleri arasında kayma hareketi gösterir. Bu mod daha karmaşık uygulamalarda kullanılır ve özellikle döner hareketlerin veya kayma kuvvetlerinin algılanmasında tercih edilir.

2. Piezoelektrik etki ve enerji toplayıcılarda kullanılan piezosensör tipleri

Piezoelektrik etki, mekanik stres veya titreşimlerin elektriksel enerjiye dönüştürülmesini sağlayan bir fenomendir. Bu etki, piezoelektrik malzemelerin özelliklerinden faydalanarak çevresel enerji kaynaklarını toplayan sistemlerde kritik bir rol oynar. Enerji toplayıcılar (energy harvesters), çevreden gelen düşük seviyedeki titreşim veya kuvvetleri elektrik enerjisine çevirerek sürdürülebilir enerji üretimi sağlar. Piezoelektrik sensörler, bu sistemlerin kalbinde yer almakta olup, farklı tip ve yapılarla enerji toplama verimliliğini artırmaya yönelik çözümler sunmaktadır. Bu sensörlerin çeşitliliği, kullanılan malzemelere, geometrik tasarımlara ve uygulama alanlarına göre şekillenmektedir.

2.1. Piezoelektrik etki

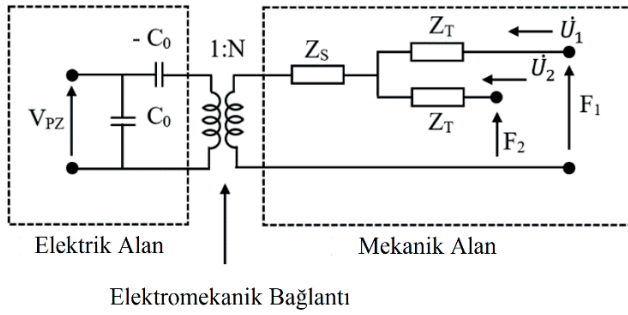
Belirli kristal yapıdaki malzemelere mekanik basınç uygulandığında, malzeme içerisindeki elektrik alan dağılımı ve buna bağlı olarak elektrik potansiyeli değişikliğe uğramaktadır. Bu değişim, doğrudan kristal içindeki kutuplanma yoğunluğunda meydana gelen farklılıklara bağlıdır. Piezoelektrik özellik gösteren bu tür kristaller, uygulanan mekanik gerilmeye karşılık elektriksel bir gerilim üretme kapasitesine sahiptir. Öte yandan, piezoelektrik malzemeler yalnızca doğrudan piezoelektrik etkiyi değil, aynı zamanda ters piezoelektrik etkiyi de sergiler; bu kapsamda, uygulanan bir elektrik alan sonucunda malzeme üzerinde mekanik deformasyon ve iç gerilme oluşumu gözlemlenmektedir [18]. Piezoelektrik malzemelerin elektriksel ve mekanik yanıtları, sistematik olarak aşağıda verilen iki temel eşitlik aracılığıyla modellenebilmektedir [19].

$$\begin{cases} [T] = [c^E][S] - [e][E] \\ [D] = [e][S] + [\epsilon^S][E] \end{cases} \quad (15)$$

burada, $[T]$, $[S]$, $[E]$ ve $[D]$ sırasıyla gerilim vektörü, gerinim vektörü, elektrik alanı vektörü ve elektriksel indüksiyon vektörüdür. $[c^E]$, $[e]$ ve $[\epsilon^S]$ piezoelektrik malzemenin fiziksel özellikleri olup, sabit elektrik alanında belirlenen elastik sertlik matrisi, piezoelektrik gerilim matrisi ve sabit gerinimdeki geçirgenlik matrisidir.

Piezoelektrik bir enerji toplayıcının elektriksel ve mekanik davranışları, Eşitlik 15 ile matematiksel olarak ifade edilebilmekte olup, bu yapıların eşdeğer elektriksel devre modeli Şekil 3'te ayrıntılı bir biçimde sunulmaktadır [20]. Söz konusu eşdeğer devre, piezoelektrik malzemenin mekanik

deformasyona karşı oluşturduğu elektriksel yanıtı temsil etmek amacıyla bir akım kaynağı (mekanik kuvveti simgeleyen) ve bu akıma karşılık gelen elektriksel özellikleri modelleyen paralel bağlı bir kapasitör ile bir içsel dirençten oluşmaktadır. Kapasitör, piezoelektrik malzemenin elektriksel yük depolama kapasitesini (dielektrik özelliklerini) temsil ederken; direnç, malzemedeki enerji kayıplarını ve içsel sönümlmeyi ifade etmektedir. Bu tür bir modelleme yaklaşımı, piezoelektrik enerji dönüştürücülerin dinamik karakteristiklerinin analiz edilmesine, performanslarının değerlendirilmesine ve çeşitli uygulamalar için optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.



Şekil 3. Piezoelektrik enerji toplayıcısının eşdeğer devre modeli

Burada C_0 , piezoelektrik elemanın blokaj (yük akışı olmadan) altında ölçülen eşdeğer elektriksel kapasitansını temsil etmektedir. N parametresi, malzemenin elektromekanik kuplaj katsayısını ifade etmekte olup, elektriksel ve mekanik enerjiler arasındaki etkileşim düzeyini belirlemektedir. Devrede tanımlanan Z_s ve Z_T empedans bileşenleri ise piezoelektrik elemanın mekanik özelliklerini modellemektedir. Mason eşdeğer devre modelinin sağ tarafında bulunan iki port, mekanik giriş ve çıkış noktalarını temsil etmektedir. Bu portlar üzerinden tanımlanan U_1 ve F_1 büyüklükleri sırasıyla üst yüzeydeki titreşim hızını ve uygulanan toplam mekanik kuvveti; U_2 ve F_2 ise alt yüzey için karşılık gelen büyüklükleri ifade etmektedir. Şekilde gösterildiği üzere, portlar arasındaki bu çift yönlü ilişki, piezoelektrik elemanın hem mekanik girişlere hem de elektriksel çıktılara duyarlı bir enerji dönüşüm mekanizması sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu kapsamlı modelleme yaklaşımı, piezoelektrik elemanların hem elektriksel hem de mekanik sınır koşullarını eşzamanlı olarak göz önünde bulundurarak sistem performansının daha doğru bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Eşdeğer devre için çeşitli parametreler Eşitlik 16-20'de tanımlanmıştır:

$$Z_s = \frac{z}{i \sin \frac{wl}{V_b^D}} \quad (16)$$

$$Z_T = iZ \tan \frac{wl}{2V_b^D} \quad (17)$$

$$C_0 = \frac{wt}{l} \varepsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2) \quad (18)$$

$$V_b^D = \sqrt{\frac{C_{33}^D}{\rho}} \quad (19)$$

$$N = \frac{wt}{l} \frac{g_{\infty}}{s_{\infty}^E \beta_{\infty}^T} = \frac{wt}{l} \frac{d_{\infty}}{s_{\infty}^E} = \frac{wt}{l} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\infty}^T}{s_{\infty}^E}} k_{\infty}, Z = \rho wt V_t^D \quad (20)$$

Denklem 20 ,deki geometrik parametreler:

w= Piezoelektrik malzemenin genişliği (width)

t=Kalınlığı (thickness)

l=Uzunluk (lenght)

V_{Dt} =Piezoelemanın sürtünmeden dolayı uyarladığı hacim

ρ =Yoğunluk (denisty)

Elektromekanik sabitler:

g_{∞} = Piezoelektrik gerilim sabiti (V.m/N)

d_{∞} = Piezoelektrik deformasyon katsayısı (C/N)

$s_{E\infty}$ =Elektrik alan altında elastikiyet katsayısı (m2/N)

$B_{T\infty}$ = Sabit sıcaklıkta elektrik geçirgenliği (elektriksel uyum katsayısı)

$\varepsilon_{T\infty}$ = Dielektrik geçirgenlik sabiti (at constant stress)

k_{∞} = elektromekanik bağ katsayısı (coupling factor), boyutsuz

2.2. Enerji Hasatlayıcı Sistemlerinde Kullanılan Piezoelektrik Sensör Tipleri

Enerji Hasatlayıcı (Energy harvester) sistemlerinde, çevresel enerji kaynaklarını elektriksel enerjiye dönüştürmek amacıyla farklı piezoelektrik

sensor tipleri kullanılmaktadır. Bu sensörler, çevredeki titreşim, basınç ve mekanik stres gibi enerjileri piezoelektrik etki sayesinde elektriksel enerjiye dönüştürerek, özellikle düşük güçlü uygulamalarda sürdürülebilir enerji üretimi sağlar. Farklı piezoelektrik malzemeler ve yapılar, enerji verimliliğini artırmak ve uygulama alanlarına uygun çözüm sağlamak için çeşitlendirilmiştir.

2.2.1. Tek katmanlı (unimorph) Piezoelektrik Sensörler

Tek katmanlı diyafram piezoelektrik transdüserler, iki katmandan oluşan bir yapı prensibine dayanmaktadır. Bu yapılarda, aktif piezoelektrik katman bir pasif elastik tabaka ile birleştirilmiştir. Piezoelektrik katmana bir elektrik alan uygulandığında, piezoelektrik etki nedeniyle bu katman boyutsal bir değişim geçirirken, pasif tabaka bu değişime direnç gösterir. Bu iki katman arasındaki mekanik uyumsuzluk, genel yapının bükülmesine veya eğilmesine (deformasyonuna) yol açar. Özellikle diyafram yapı, kenarlarından sabitlenmiş ince bir plaka formunda tasarlanarak merkezde maksimum deformasyonun elde edilmesi sağlanır [21,22,23].

Tek katmanlı sistemlerde piezoelektrik katman çoğunlukla kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi yüksek piezoelektrik katsayılarına sahip seramik malzemelerden üretilirken, pasif tabaka ise genellikle metal (örneğin paslanmaz çelik) veya polimer esaslı esnek bir malzeme olabilir.

Bu tür bir transdüser hem aktüatör (hareket üretici) hem de sensör (algılayıcı) işlevi görebilir:

- Sensör modunda, uygulanan mekanik kuvvet veya titreşim piezoelektrik katmanda elektriksel bir yük (volta) üretilmesine neden olur.
- Aktüatör modunda ise uygulanan bir elektriksel sinyal, yapının mekanik hareket üretmesine neden olur.

Diyafram tipi tek katmanlı piezo transdüserler, yüksek hassasiyetli basınç algılama, titreşim enerjisi toplama, akustik dalga üretimi ve mikropompalama sistemleri gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca kompakt yapıları sayesinde MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) tabanlı uygulamalarda da önemli bir yere sahiptirler.

Yapısal olarak diyaframın kenarları sabitlenmiş olduğundan, piezoelektrik deformasyon diyafram merkezinde en büyük yer değiştirmeyi üretir. Bu da özellikle düşük frekanslı mekanik titreşimlerin veya basınç değişimlerinin algılanmasında yüksek verimlilik sağlar.

Tek katmanlı transdüserlerde üretilen elektrik sinyali, diyaframın mekanik rezonans frekansı ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla, sistem tasarımı sırasında diyafram geometrisi (kalınlık, yarıçap, malzeme özellikleri) rezonans frekansı ve sensör performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bir tek katmanlı piezoelektrik transdüserin çalışma prensibi, piezoelektrik malzemenin elektriksel özellikleri ile mekanik davranışları arasındaki ilişkiye dayanır. Bu tür bir transdüser, genellikle şu fiziksel parametrelerle modellenir:

1. Piezoelektrik Etki (Elektriksel Yanıt) Piezoelektrik malzeme, üzerine uygulanan mekanik kuvvetle orantılı olarak elektriksel bir gerilim üretir. Bu ilişki, piezoelektrik eşitlik ile ifade edilebilir:

$$V = \frac{d_{33} \cdot F}{C_0} \quad (21)$$

Burada, V , piezoelektrik elemanın uçları arasındaki gerilimi (voltaj) temsil eder, d_{33} piezoelektrik malzemenin piezoelektrik katsayısıdır (santimetre başına volt-coulomb). F , piezoelektrik katmana uygulanan mekanik kuvveti (newton) ifade eder. C_0 , piezoelektrik malzemenin blokaj altında ölçülen kapasitansdır (farad).

2. Mekanik deformasyon ve titreşim tek katmanlı transdüserde piezoelektrik malzemenin mekanik deformasyonu, pasif tabakanın direnç gösterdiği bir ortamda meydana gelir. Bu deformasyon, diyaframın merkezinde maksimuma ulaşır. Diyaframın merkezindeki yer değiştirme, aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$\Delta x = \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \quad (22)$$

Burada; Δx , diyaframın merkezindeki yer değiştirmeyi (m) gösterir. F , uygulanan mekanik kuvveti (N) ifade eder. L , diyaframın kenar uzunluğudur (m). E , malzemenin elastik modülüsüdür (Pa). I , diyaframın ikinci momenti (m⁴) olup, diyaframın şekline ve boyutlarına bağlıdır.

3. Rezonans Frekansı tek katmanlı piezoelektrik transdüserlerin mekanik rezonans frekansı, diyaframın boyutlarına ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Rezonans frekansı f_0 , aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (23)$$

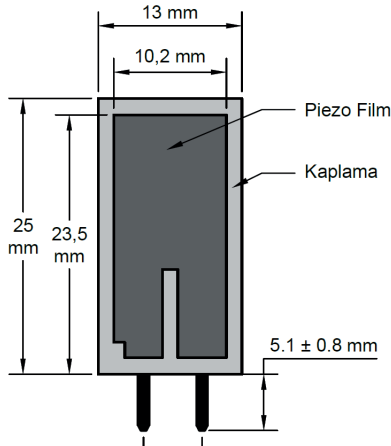
2.2.2. İki katmanlı (bimorph) Piezoelektrik Sensörler

İki katmanlı piezoelektrik sensörler, iki adet piezoelektrik malzemenin birbirine paralel olarak yerleştirilmesinden oluşur. Bu sensörler, her iki piezoelektrik katmanın elektriksel özelliklerinden faydalanır ve birlikte çalışarak daha yüksek çıkış gücü üretirler. Bu yapı, piezoelektrik malzemelerin mekanik stres altında deformasyona uğramasıyla birlikte elektriksel gerilim üretir. İki katmanlı yapılar özellikle bükülme hareketlerinden faydalanan sistemlerde tercih edilir [25,26,27,28].

- **Yapı:** Her iki piezoelektrik katman farklı yönlerde yerleştirilir ve genellikle bir metal ya da elastik malzeme, katmanlar arasında bağlayıcı olarak kullanılır.
- **Çalışma Prensibi:** Her iki piezoelektrik katman, uygulanan mekanik kuvvetle deformasyona uğrar ve bu deformasyon sonucu her iki katman üzerinde elektriksel yük birikir. Bu katmanlar arasındaki gerilim farkı, daha yüksek elektriksel çıkış sağlar.
- **Kullanım Alanları:** Düşük frekanslı titreşimler, otomatik kontrol sistemleri, mikro-hareket dedektörleri ve ses algılama gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

2.2.3. İnce (thin film) Piezoelektrik Sensörler

İnce film piezoelektrik sensörler, piezoelektrik malzemenin çok ince bir katman halinde kullanıldığı sensörlerdir. Bu sensörler, genellikle MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) tabanlı sistemlerde kullanılır [29,30,31,32]. Şekil 5'te ticari olarak üretilen bu tip bir piezosensör yapısı verilmiştir.



Şekil 5. Film tip piezoelektrik dönüştürücü yapısı

- **Yapı:** Piezoelektrik malzeme, çok ince bir film formunda, genellikle birkaç mikrometre kalınlığında, yüzey üzerine uygulanır. İnce film yapıları, yüksek hassasiyetli ve mikro düzeyde enerji toplama için uygundur.
- **Çalışma Prensibi:** İnce film piezoelektrik sensörlerde, piezoelektrik malzeme üzerine uygulanan mekanik gerilim, çok küçük bir elektriksel yük üretir. Bu yük, mikro enerjilerin toplanmasında kullanılır.
- **Kullanım Alanları:** MEMS tabanlı sistemler, mikro-elektronik cihazlar ve çok küçük enerji toplama sistemlerinde kullanılır. Ayrıca biyomedikal sensörlerde de bu sensörler kullanılarak düşük güçlü enerjiler toplanabilir

2.2.4. Yığın (stacked) Piezoelektrik Sensörler

Yığın piezoelektrik sensörler, birkaç piezoelektrik katmanın üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulur. Bu yapı, her katmanın piezoelektrik etkisini birleştirerek daha büyük bir elektriksel çıkış üretir. Yığın yapı, piezoelektrik sensörün elektriksel kapasitesini artıran bir yöntemdir [33,34,35,36].

- **Yapı:** Birkaç piezoelektrik katman, birbirine paralel olarak ve bir yapıştırıcı ile birleştirilir. Katmanlar arasında bir elektriksel bağlantı sağlanarak her katmanın ürettiği gerilim birleştirilir.
- **Çalışma Prensibi:** Bu sensörler, mekanik kuvvetlerin veya titreşimlerin her katmana etki etmesi sonucu her bir katman üzerinde elektriksel yük birikimi yapar. Bu yükler, tüm katmanlar bir araya geldiğinde daha yüksek bir voltaj üretir.
- **Kullanım Alanları:** Yüksek güç çıkışı gereken uygulamalarda kullanılır. Örneğin, mikro jeneratörler, otomotiv endüstrisi ve enerji toplama sistemlerinde tercih edilir.

2.2.5. Eğilme (flexural) Piezoelektrik Sensörler

Eğilme piezoelektrik sensörler, piezoelektrik malzemenin eğilme hareketlerine duyarlı olduğu sensörlerdir. Bu sensörler genellikle ince şeritler veya diyaframlar şeklinde tasarlanır. Uygulanan mekanik gerilme, piezoelektrik malzeme üzerinde bükülme hareketi yaratır ve bu hareket elektriksel enerjiye dönüşür [37,38,39,40].

- **Yapı:** Piezoelektrik malzeme, bir yüzeyde yer alan mekanik kuvvetler nedeniyle eğilir ve genellikle esnek bir temel üzerine yerleştirilir. Diyafram veya şerit yapılar, mekanik titreşimleri algılamak için idealdir.

- **Çalışma Prensibi:** Piezoelektrik malzeme, mekanik bir kuvvetle büküldüğünde, malzeme içinde elektriksel yük birikimi oluşur. Bu yük, piezoelektrik malzemenin elektriksel özellikleri sayesinde ölçülebilir ve enerjiye dönüştürülür.
- **Kullanım Alanları:** Düşük frekanslı titreşimlerin algılanmasında, mikro ölçüm sistemlerinde ve tıbbi cihazlarda kullanılır. Ayrıca, rüzgar enerjisi toplama sistemlerinde de bu tür sensörler kullanılabilir.

2.2.6. Tek uçlu kiriş (cantilever) Piezoelektrik Sensörler

Tek uçlu kiriş piezoelektrik sensörler, bir ucundan sabitlenmiş ve diğer ucu serbest bırakılmış piezoelektrik malzemeden oluşan sensörlerdir. Bu sensörler, genellikle çevresel titreşimler veya dışsal mekanik kuvvetler tarafından tetiklenen hareketlere duyarlıdır [41,42,43].

- **Yapı:** Tek uçlu kiriş sensör, sabit uç ve serbest uç arasında bir çubuk veya diyafram şeklinde tasarlanır. Piezoelektrik malzeme, bu yapının üzerine yerleştirilir ve titreşimler, çubuğun hareketine neden olur.
- **Çalışma Prensibi:** Sabit uca uygulanan bir kuvvet veya çevresel titreşimler, cantilever yapısının serbest ucunda bir yatay hareket veya eğilme yaratır. Bu hareket, piezoelektrik malzeme üzerinde elektriksel yük birikmesine yol açar.
- **Kullanım Alanları:** Enerji toplama sistemlerinde, düşük frekanslı titreşimlerin algılandığı sistemlerde ve mikro ölçüm cihazlarında kullanılır. Ayrıca, otomotiv ve uçak endüstrisinde de yaygın olarak tercih edilir.

2.2.7. Küresel (spherical) Piezoelektrik Sensörler

Küresel piezoelektrik sensörler, genellikle 3D enerji toplama sistemlerinde kullanılır. Bu sensörler, piezoelektrik malzemenin küresel bir formda yerleştirildiği sistemlerdir. Bu yapı, titreşimleri çok yönlü olarak toplayabilir [44,45,46].

- **Yapı:** Piezoelektrik malzeme, küresel bir şekil altında tasarlanır. Küresel yapı, titreşimlerin her yönden eşit bir şekilde algılanmasını sağlar.
- **Çalışma Prensibi:** Küresel sensör, çevresel titreşimleri tüm yüzeyi üzerinden toplar. Piezoelektrik malzeme, her yönden gelen mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştürür.
- **Kullanım Alanları:** Çok yönlü titreşimlerin bulunduğu ortamlarda, özellikle büyük yapılar ve endüstriyel makinelerde kullanılır.

Kaynakça

- Uchino, K. (2017). The development of piezoelectric materials and the new perspective. In K. Uchino (Ed.), *Advanced Piezoelectric Materials (Second Edition)* (pp. 1-92). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1>
- Gupta, M. N., Suman, & Yadav, S. K. (2014). Electricity generation due to vibration of moving vehicles using piezoelectric effect. *Advances in Electronic and Electric Engineering*, 4(3), 313-318.
- Dineva, P. S., Gross, D., Müller, R., et al. (2014). Dynamic fracture of piezoelectric materials. In *Solid Mechanics and Its Applications* (Vol. 212, pp. 1-21). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03961-9_2
- Safari, A., & Akdoğan, E. K. (2023). *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23235-1>
- Hasegawa, K., & Sato, S. (2013). Perfectly matched layers for elastic waves in piezoelectric solids. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(7), 07HE01. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40019756508>
- Lee, G.-J. (2022). Piezoelectric voltage constant and sensitivity enhancements through phase boundary structure control of lead-free (K,Na)NbO₃-based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(12), 4898-4906. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.05.025>
- Bharti, V., Xu, T. B., Cheng, Z., Mai, T., Zhang, Q., Ramotowski, T., & Wright, K. A. (2001). High electromechanical coupling factor and electrostrictive strain over broad frequency range in electrostrictive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer films. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40(2), 672-675. <https://doi.org/10.1143/JJAP.40.672>
- Yan, Y., Geng, L. D., Liu, H., Leng, H., Li, X., Wang, Y. U., & Priya, S. (2022). Near-ideal electromechanical coupling in textured piezoelectric ceramics. *Nature Communications*, 13(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31165-y>
- Xu, T. B., Cheng, Z., Mai, T., Lu, Y., & Zhang, Q. M. (2000). Electromechanical coupling factor of electrostrictive P(VDF-TrFE) copolymer. In *International Ultrasonics Symposium* (Vol. 2, pp. 997-1000). <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2000.921492>
- Lu, R., Li, M.-H., Yang, Y., Manzanque, T., & Gong, S. (2019). Accurate extraction of large electromechanical coupling in piezoelectric MEMS resonators. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 28(2), 209-218. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2019.2892708>
- Smyth, K., Sodini, C. G., & Kim, S.-G. (2017). High electromechanical coupling piezoelectric micro-machined ultrasonic transducer (PMUT) ele-

- ments for medical imaging. In *International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (pp. 966–969). <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994211>
- Uchino, K. (2018). Piezoelectric energy harvesting systems with metal oxides. In Y. Wu (Ed.), *Metal Oxides in Energy Technologies* (pp. 91–126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811167-3.00005-5>
- Wang, G., Yang, Y., Zhou, Z., Ren, X., Ji, Y. (2025). High mechanical quality factor and high piezoelectric coefficient achieved via acceptor-modified invisible boundary. *Journal of the European Ceramic Society*, 45(5), 117100. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117100>
- Tang, D., Rao, S., Ding, C., & Qin, C. (2025). Ultrasonic dry-coupling detection with gradient acoustic impedance match layer. *Applied Acoustics*, 228, 110355. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110355>
- Akkaya, S. O. (2020). A piezoelectric energy harvesting from the vibration of the airflow around a moving vehicle. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30, e12655. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12655>
- Sienkiewicz, M. L. K. (2016). Concept, implementation and analysis of the piezoelectric resonant sensor/actuator for measuring the aging process of human skin (PhD thesis). Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- Tian, W., Ling, Z., Yu, W., & Shi, J. (2018). A review of MEMS scale piezoelectric energy harvester. *Applied Sciences*, 8(645). <https://doi.org/10.3390/app8040645>
- Yang, Y., & Tang, L. (2009). Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(18), 2223–2235. <https://doi.org/10.1177/1045389X09351757>
- Lefevre, E., Badel, A., Richard, C., et al. (2006). A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 126(2), 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.08.001>
- Sherrit, S., Leary, S. P., & Dolgin, B. P. (1999). Comparison of the Mason and KLM equivalent circuits for piezoelectric resonators in the thickness mode. *1999 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 921–926. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1999.1181784>
- Thacker, E. J. (2022). Simulation studies on bimorph and unimorph PZT piezoelectric transducer for energy harvesting application. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 299–308). https://doi.org/10.1007/978-981-19-2095-0_26
- Zarog, M. (2024). Design and analysis of unimorph double-clamped energy harvester. *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on*

- Materials and Energy Engineering*, 341–344. <https://doi.org/10.1109/icom61675.2024.10652567>
- Jeong, S.-S., & Park, T.-G. (2014). Generating the characteristics of a modified unimorph-type piezoelectric harvester. *Journal of the Korean Physical Society*, 65(2), 205–210. <https://doi.org/10.3938/JKPS.65.205>
- Akkaya Oy, S. (2021). A design of mass-spring type piezoelectric energy harvesting. *Scientia Iranica D*, 28(6), 3504–3511.
- Aloui, R., Larbi, W., & Chouchane, M. (2017). Finite element modeling and analysis of a bimorph piezoelectric energy harvester. In *Springer Advances in Mechanics and Materials* (pp. 1205–1214). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_118
- Dong, X., Yi, Z., Kong, L., Tian, Y., Liu, J., & Yang, B. (2019). Design, fabrication, and characterization of bimorph micromachined harvester with asymmetrical PZT films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 28(4), 700–706. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2019.2920213>
- Li, J., Jang, S., & Tang, J. (2012). Design of a bimorph piezoelectric energy harvester for railway monitoring. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 32(6), 661–668. <https://doi.org/10.7779/JKSNT.2012.32.6.661>
- Mallouli, M., & Chouchane, M. (2017). Analytical modeling and analysis of a bimorph piezoelectric energy harvester. In *Springer Advances in Mechanics and Materials* (pp. 1179–1189). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_116
- Varadha, E., Kumar, S. R., & Jain, X. S. A. (2021). Wind-driven leaf-like thin-film piezoelectric harvester for low wind applications. *Journal of Vibration Engineering & Technology*, 9, 1005–1022. <https://doi.org/10.1007/s42417-020->
- Tao, K., Yi, H., Tang, L., Wu, J., Wang, P., Wang, N., Hu, L., Fu, Y., Miao, J., & Chang, H. (2019). Piezoelectric ZnO thin films for 2DOF MEMS vibrational energy harvesting. *Surface and Coatings Technology*, 359, 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.102>
- Wang, B., Lan, D., Zeng, F., & Li, W. (2022). Vibration energy conversion power supply based on the piezoelectric thin film planar array. *Sensors*, 22(21), 8506. <https://doi.org/10.3390/s22218506>
- Liu, Y., Cai, Y., Zang, Y., Tovstopyat, A., & Liu, S. (2020). Properties of aluminum nitride thin films for piezoelectric transducers and microwave filter applications. *Applied Physics Letters*, 99(12), 123456.
- Dipon, W., Gamboa, B., Guo, R., & Bhalla, A. (2022). Energy harvesting using a stacked PZT transducer for self-sustainable remote multi-sensing and data logging system. *Journal of Composites Science*, 6(2), 49. <https://doi.org/10.3390/jcs6020049>

- Min, Z., Hou, C., Sui, G., Shan, X., & Xie, T. (2023). Simulation and experimental study of a piezoelectric stack energy harvester for railway track vibrations. *Micromachines*, 14(4), 892. <https://doi.org/10.3390/mi14040892>
- Akhlaq, M., Wasim, M. F., Ashraf, M. W., & Tayyaba, S. (2023). Parametric estimation of stacked piezoelectric energy harvester. In V. E. Balas, L. C. Jain, M. M. Balas, & D. Baleanu (Eds.), *Soft Computing Applications* (Vol. 1438, pp. 541–550). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23636-5_43
- Shan, G., & Zhu, M. (2022). A piezo stack energy harvester with frequency up-conversion for rail track vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168, 109268. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109268>
- Fu, X., Cao, Y., Song, X., Sun, R., Jiang, H., Du, P., Peng, D., & Luo, L. (2024). Flexible piezoelectric energy harvesters with mechanoluminescence for mechanical energy harvesting and stress visualization sensing. *Advanced Functional Materials*, 35(2), 2412507. <https://doi.org/10.1002/adfm.202412507>
- Choudhry, I., Khalid, H. R., & Lee, H.-K. (2020). Flexible piezoelectric transducers for energy harvesting and sensing from human kinematics. *ACS Applied Electronic Materials*, 2(10), 3346–3357. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00636>
- Kim, Y., & Cha, Y. (2022). Energy harvesting from flexion motion using a flexible piezoelectric ring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 343, 113664. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113664>
- Zhou, Y., Li, M., Zhang, Y., Wang, Y., & Wang, Z. L. (2023). 3D printed auxetic structure-assisted piezoelectric energy harvesting and sensing. *Advanced Energy Materials*, 13(27), 2301159. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301159>
- Kurt, P., & Orhan, S. (2024). Improving energy harvesting from cantilever-like structures based on beam geometry. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12, 7781–7797. <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01326-y>
- Ren, Q., Liu, Y., & Wang, D. (2025). Research on low-frequency multi-directional piezoelectric energy harvester with combined cantilever beam. *Chinese Journal of Electronics*, 34(5), 805–813.
- Dewanjee, J., & Islam, M. S. (2023). Piezoelectric based V-shape cantilever beam design of energy harvester for biomedical applications. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 15(1), 73–81. <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00652>
- Gantasala, S., Thomas, T., & Rajagopal, P. (2023). Enhanced piezoelectric energy harvesting based on sandwiched phononic crystal with embedded sphe-

res. *Physica Scripta*, 98(3), 035029. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acb9c5>

- Shi, G., Zeng, W., Xia, Y., Xu, J., Jia, S., Li, Q., Wang, X., Xia, H., & Ye, Y. (2023). A floating piezoelectric electromagnetic hybrid wave vibration energy harvester actuated by a rotating wobble ball. *Energy*, 270, 126808. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126808>
- Li, R., Zhang, H., Li, W., & Liu, G. (2021). Piezoelectric impact energy harvester based on the composite spherical particle chain for self-powered sensors. *Sensors*, 21(9), 3151. <https://doi.org/10.3390/s21093151>

