

## Zemine Entegre Piezoelektrik Sensörden Enerji Hasadı

**Birol ÇAVUŞ<sup>1\*</sup>, Sibel AKKAYA OY<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Yenilenebilir Enerji, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye

<sup>2</sup> Deniz Teknolojisi Anabilim Dalı Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Fatsa Deniz Bilimleri Fakültesi, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye

\*<sup>1</sup> b\_cavus@hotmail.com, <sup>2</sup> sibelakkaya@odu.edu.tr

(Geliş/Received: 07/04/2023;

Kabul/Accepted:26/10/2023)

**Öz:** Bu çalışma insan hareketliliğinin fazla olduğu yerlerde, düşük güçlü uygulamalar için zemine yerleştirilen piezoelektrik seramik dönüştürücülere dayalı deneysel bir enerji hasat sistemini tanıtmaktadır. Yalnızca bir PZT'nin üretebildiği gerilim tek başına bir sisteme enerji verebilecek seviyede değildir. Bu yüzden PZT'ler hasat edilen gücü en üst seviyeye çıkarabilecek uygun devre topolojisiyle seri ve paralel bağlanarak elde edilecek toplam güç artırılmıştır. Deneysel çalışmada 20 × 30 cm'lik ahşap bir zeminin her bir kısa kenarına 5 adet PZT yerleştirilmiş, toplamda 10 adet PZT'den 10 adet gerilim ikileyici ile enerji hasadı yapılmıştır. Dört farklı ağırlıkta birey üç farklı yürüme hızında bir dakika boyunca deney düzeneğine basmış ve tüm sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiştir. Yük olarak 220 KΩ direnç kullanılmıştır. Deney düzeneği 48 kg ağırlığındaki bireyle test edildiğinde maksimum 23,42 µW (2,27 volt), 58 kg ağırlığında 13,13 µW (1,70 volt), 71 kg ağırlığında 59,56 µW (3,62 volt), 85 kg ağırlığında 55,68 µW (3,50 volt) gerilim hasat edilmiştir. Deneysel sonuçlar aynı bireyin yürüme hızı arttıkça elde edilecek ortalama gerilimin yükseldiğini, ayrıca aynı yürüme hızlarındaki bireylerden ağır olanın daha fazla enerji hasat edilmesini sağladığını göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Piezo, zemin, enerji hasadı, gerilim ikileyici

### Energy Harvesting From Floor Integrated Piezoelectric Sensor

**Abstract:** This study introduces an experimental energy harvesting system based on ground-mounted piezoelectric ceramic transducers for low-power applications where human mobility is high. The voltage that only a PZT can produce is not at a level that can energize a system alone. Therefore, the total power to be obtained has been increased by connecting PZTs in series and parallel with the appropriate circuit topology that can maximize the harvested power. In the experimental study, 5 PZTs were placed on each short side of a 20 × 30 cm wooden floor, and energy was harvested from 10 PZTs in total with 10 voltage doublers. Individuals of four different weights stepped on the experimental setup for one minute at three different walking speeds and all results were obtained graphically. A 220 KΩ resistor is used as load. When the experimental setup was tested with an individual weighing 48 kg, a maximum power 23.42 µW (2.27 volts), 13.13 µW (1.70 volts) for 58 kg, 59.56 µW (3.62 volts) for 71 kg and 55.68 µW (3.50 volts) for 85 kg was harvested. Experimental results have shown that as the walking speed of the same individual increases, the average tension to be obtained increases, and the heavier individuals at the same walking speeds provide more energy harvest.

**Keywords:** Piezo, floor, energy harvesting, voltage doubler

### 1. Giriş

Günümüzde artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için gelişen sanayi ve teknoloji, enerjiye olan talebi de arttırmıştır. Fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması ve çevre açısından olumsuzlukları insanları alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Isı, ışık, titreşim doğada kendinden var olan enerji tipleridir. Özellikle titreşim enerjisi insan ve çevre hareketlilikleri ile doğal olarak oluşabilir. Kullanılmadığında yok olan bu enerji, geliştirilen çeşitli enerji hasatlama sistemleri ve bu sistemlerden maksimum seviyede verim alabilmek için yapılan elektronik devrelerle elektrik enerjisine çevrilebilirler.

Zhang ve arkadaşları [1] piezoelektrik enerji hasadının, titreşimli ortamlarda düşük güç tüketen cihazlar için ideal bir güç kaynağı olarak kabul edildiğini, elektronik teknolojisinin, mikro işleme teknolojisinin ve arayüz devrelerinin sürekli gelişmesiyle, PEH'in yakın gelecekte pratik uygulamalara gireceğine inanıldığını ve belirli alanlarda geleneksel enerji kaynağının yerini almasının beklendiğini belirtmişlerdir. Titreşimden ve/veya uygulanan basınçtan elektrik enerjisi üreten piezoelektrik malzemelerle ilgili giderek daha fazla çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Oy [2] kütle-yay yapısı rüzgâr etkisiyle titreşen 15cm'lik 20 adet diyafram tipi PZT'li, 12m/s nominal rüzgâr hızında sunulan deneysel jeneratörün maksimum çıkış gücünü 10.8mJ olarak

\* Sorumlu yazar: [b\\_cavus@hotmail.com](mailto:b_cavus@hotmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0009-6418-3217, <sup>2</sup> 0000-0002-1209-920X

ölçmüş, daha fazla PZT kullanarak jeneratörün çıkış gücünü arttırabileceğini ifade etmiştir. Özellikle gelişen teknolojiye bağlı olarak üretilen elektronik sistemlerin güç gereksinimlerinin düşüklüğü yani düşük güçlerde çalışabilmesi, piezoelektrik malzemelerden hasat edilen enerjinin düşük olmasına rağmen kullanılabilir olmasını sağlamıştır. Ayrıca hasat edilen enerjinin depolanması ve ihtiyaç anında kullanılabilir olması da piezoelektrik enerji hasadına ilgiyi arttırmıştır. Li ve arkadaşları [3] karayoluna yerleştirilen ve üzerinden araç geçen piezoelektrik cihazın, gerçek bir lastik yükü altında 190 V'luk bir açık devre voltajı ile yeni piezoelektrik özelliklere sahip olduğunu ve trafik parametrelerinin voltaj dalga biçiminden çıkarılabileceğini doğrulamıştır. Cho ve arkadaşları [4] gerçek karayolu üzerine kurulu yola uyumlu bir piezoelektrik enerji toplayıcıyı üzerinde çalışmışlardır. 30 km/saat araç hızında maksimum 196 V voltaj ve 2080 mW (20,79 W/m<sup>2</sup>) çıkış gücü elde etmişlerdir. Jeon ve arkadaşları [5] önerdikleri piezoelektrik enerji hasat mekanizmasıyla 1 mm'lik bir giriş yer değiştirmesi altında 50 kΩ'luk bir yük direncinde 60,3 mW'luk bir maksimum çıkış gücü elde etmişlerdir. Sonuçların, önerilen piezoelektrik enerji hasat mekanizması tarafından üretilen enerjinin akıllı yollarda elektrikli araçlar için potansiyel olarak bir güç kaynağı olarak kullanılabilirliğini kanıtlandığını belirtmişlerdir. Shenck ve Paradiso [6] 2001 yılındaki bir makalelerinde, elektrik kablolu sorunu ortadan kaldıran yeni bir yaklaşımın ortaya çıktığını, insan faaliyetlerinden kaynaklanan atık enerjiyi kullanarak cihazların kendisine elektrik enerjisi sağlayabildiğini ve depolayabildiğini yazmışlardır. Nimachwala ve Pandya [7] piezo hücreleri bir çift ayakkabıya yerleştirerek enerji hasadı ve bu enerjiyi power banka depolamayla ilgili bir çalışma yapmıştır. Wang ve arkadaşları [8] geliştirdikleri PEH ile bir insan yürürken 24Vp-p ve koşarken 55Vp-p voltaj, paralel bağlı PZT modüllere sahip PEH ile 9,2 Hz frekansında ortalama 29 µW güç ürettiklerini belirtmişlerdir. Kuang ve arkadaşları [9] insan yürüyüşünden hasat ettikleri enerji ile her aktif zamanda WSN (wireless sensor node) sensörlerden 10 ms aralıklarla 482 okuma örneği alabilmis ve tüm verileri 4 m mesafedeki bir baz istasyonuna iletebilmişlerdir. Frontoni ve arkadaşları [10] bir ayakkabının içine yerleştirilebilen ve yürürken elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilen farklı cihazları incelemişlerdir. Ana amacı taşıyıcı yürürken periyodik olarak dijital bir RFID yayınlayan ayakkabılara gömülü bir iç mekân lokalizasyon sisteminin geliştirilmesi olan çalışmanın sonuçlarını cesaret verici olarak değerlendirmişlerdir. Starner [11] insanın yürümesinin önemli bir enerji hasadı kaynağı olduğunu, hızlı bir tempoda yürüyen ortalama (68 kg) bir kişinin (ayak dikey olarak 5 cm hareket ederken saniyede iki adım) topuk hareketinde 67 watt gücün mevcut olduğunu tahmin etmiştir. Rocha ve arkadaşları [12] yürüyen insanlardan enerji toplamak için piezoelektrik polimerlerin kullanımını ve enerjiyi üretip biriktirebilen bir ayakkabının imalatını anlattıkları bir makale yayımlamışlardır. Basit konfigürasyon ve elektronik sayesinde enerji hasadının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Elektronik cihazların işleyişine uygun enerji değerleri elde etmek ve elektromekanik dönüşümü iyileştirmek için malzemede iyileştirmeler yapmak gerektiğini yazmışlardır. Enerji transferini optimize etmek için enerji hasatının ve piezoelektrik jeneratörlerin geometrisinin ve sayısının kesin olarak belirlenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Iswanto ve arkadaşları [13] adımdan piezoelektrik enerji hasadı ile ilgili yaptıkları çalışmada, elde ettikleri verilerin tartışmasına ve analizine dayanarak, piezoelektrik tarafından üretilen akım ve voltajın verilen kuvvetin büyüklüğü ile orantılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen en yüksek akım 938 mikroamper, en düşük akım 641 mikroamperdir. Elde edilen en yüksek voltaj 80 volt, en düşük voltaj ise 67 voltur. Elde edilen enerji ile pil şarjı üzerine de araştırma yapmışlardır. Buna göre piezoelektrik zemine basma sıklığının pil şarjını etkilediğini belirtmişlerdir. Frekans ne kadar yüksek olursa, akımın o kadar kararlı olduğu ve pilin o kadar hızlı şarj olduğu sonucuna varmışlardır. Boutaldat ve arkadaşları [14] poliviniliden florür filminden oluşan akıllı bir yapının yürüme sırasında ayak tarafından üretilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için ayakkabı içindeki uygulamasını değerlendirdikleri bir çalışma yapmışlardır. 200 N sıkıştırma kuvveti altında poliviniliden florür filmin maksimum hasat gücünün 5,37 µW olduğu bulmuşlardır. Lim ve arkadaşları [15] insanların piezoelektrik transduser yerleştirilen karolar üzerinde yürüdüklerinde enerji üreten bir prototip yapmışlardır. Düşük voltajlı elektronik cihazlarda uygulamaların mevcut olduğunu ve piezoelektrik malzemelerin sayısının ve bağlantısının çıkış voltajını etkileyeceğini belirtmişlerdir. Kymissis ve arkadaşları [16] bir ayakkabının içine yerleştirilebilen ve yürürken "parazitik" elektrik gücü üretmek için kullanılabilen üç farklı cihazı incelemişlerdir. Hem PVDF hem de PZT, standart bir koşu spor ayakkabısına kolayca entegre edilmiş ve kendi kendine güç sağlayan RFID etiketi, faydalı işlemlere güç sağlamak için birkaç adımda yeterli enerji toplayabilmiştir. Apriyanto ve arkadaşları [17] IoT uygulamaları için bir PEH modül önermiş ve yaptıkları çalışmada her adım için 7,436 µJ, 40 kez 45 kg yük basıncıyla 297,4 µJ toplam enerji üreterek basit bir enerji toplama sistemi ile IoT uygulamasındaki WSN düğümlerini besleyebilmişlerdir. Qian ve arkadaşları [18] iki aşamalı bir amplifikasyon mekanizması kullanarak insan yürüyüşünden piezoelektrik enerji elde etmiştir. Yaptıkları sayısal simülasyonlar, vücut ağırlığı 84 kg ve boyu 172 cm olan bir erkek denekten 12,8 mW ortalama güç çıkışı ve 204,7 mW tepe güç çıkışının 3,5 mph (5,6 km/s) yürüme hızında elde edilebileceğini göstermişlerdir. Deng ve arkadaşları [19] insan adımı mekanik enerjisini toplayan basınç tipi bir jeneratör önermişler, bir prototip tasarlamış ve üretmişlerdir. Önerilen basınç tipi jeneratör, basınca maruz kaldığında 82,8 cm<sup>3</sup>'lük bir hacme sahipti. Ortalama çıkış gücü, 4 km/s'lik yürüme

hızının altındayken 97 mW'a ulaşabildi. Sonuç olarak, elektromanyetik güçle çalışan çoğu cihazdan daha yüksek olan  $1,17 \text{ mW/cm}^3$  güç yoğunluğunu elde edebilmişlerdir. Zhong ve arkadaşları [20] çok katmanlı piezoelektrik bir yapı ile piezoelektrik enerji hasat zemini tasarımı yapmışlardır. Tasarlanan piezoelektrik enerji hasat zemin yapısı, yürüyen bir insanın zeminde adım atma etkisini adım frekansı gibi farklı parametrelerle simüle edebilen bir adım makinesi tarafından test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, kirişlerin paralel bağlı olduğu bir grup dört katmanlı prototipin maksimum çıkış gücünün 4 mm'lik bir vuruşta ve 0,83 Hz'lik bir adım frekansında  $960,9 \mu\text{W}$  olduğunu göstermiştir. Song ve arkadaşları [21] gerçek bir yürüyüş yoluna kurulabilen bir kaldırım taşı piezoelektrik enerji toplayıcı önermişlerdir. Yürüme yolu sinyal göstergesine (sınırlayıcı) güç verebilen ve ayrıca pil olmadan yürüme yolunun yakınında çevresel verileri (nem ve sıcaklık gibi) toplayabilen bir Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemi geliştirmişlerdir. Gerçekçi koşullara uygulanan enerji depolama testi, yani 60 kg'lık bir kişi (ortalama ağırlık koşulu) modülün üzerinden 10 kez geçtiğinde bir kapasitörü ( $1000 \mu\text{F}$ )  $55,6 \text{ mJ}$ 'ye şarj etti. Sonuç olarak gerçek bir geçit üzerine kurulu bir sınırlayıcıyı başarıyla açmış ve harici bir enerji kaynağı olmadan IoT sensör sistemine güç vermiştir. Wang ve arkadaşları [22] insan hareketinden doğrusal olmayan piezoelektrik enerji hasadının optimum direnç analizi ve deneysel olarak doğrulamasının yapılmasını amaçladıkları çalışmalarında 65 kg ağırlık ve 167 cm bir denekle  $7 \text{ km/s}$ 'lik çalışma hızında  $30,55 \text{ mW}$ 'lık maksimum güç elde etmişlerdir. Türkmen ve Çelik [23] piezoelektrik malzeme entegre ettikleri ayakkabıdan enerji hasadı yaptıkları çalışmalarında 90 kg ağırlığında yürüyen bir insanın  $1,43 \text{ mV}$  güç üretebileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada insan hareketliliğinin fazla olduğu yerlerde, düşük güçlü uygulamalar için zemine yerleştirilen piezoelektrik seramik dönüştürücülere dayalı deneysel bir enerji toplama sistemi önerilmiştir. Toplam 10 adet PZT kullanılmış, dört farklı ağırlıkta birey üç farklı yürüme hızında bir dakika boyunca deney düzeneğine basmıştır. Birçok çalışmada kullanılan, her alternansta iki adet ileri voltaj düşümü yüksek diyotun devrede olduğu tam dalga doğrulama yönteminin aksine her alternansta ileri voltaj düşümü küçük bir adet diyotun devrede olduğu gerilim ikileyicilerle enerji hasadı yapılmıştır. Böylece diyotlardan kaynaklanan gerilim kaybı azaltılmıştır. Çalışma, literatürde tek bir bireyin yürümesinden enerji hasadı ile ilgili yapılan araştırmalardan farklı olarak dört farklı bireyle PZT'ye uygulanan ağırlıkların değişkenliklerinin test edilmesi ve insanın normal yürüme temposu civarında üç farklı yürüme hızında enerji hasadına ait sonuçlar vermesi açısından özgün ve yapılacak diğer araştırmalara örnek olacak niteliktedir.

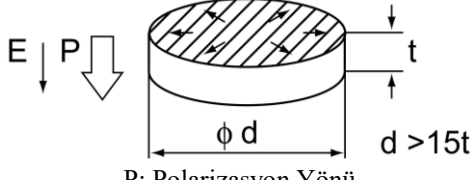
## 2. Tasarım

### 2.1. Piezoelektrik etki ve sensörler

“Piezoelektrik seramikler, piezoelektrik ve ters piezoelektrik etki olarak bilinirler. Piezoelektrik etki, mekanik titreşime maruz kaldığında bir kristalin elektrik üretmesidir. Ters piezoelektrik etki, kristalin bir elektrik alanı içindeyken mekanik titreşim üretmesidir. Piezoelektrik malzemelerden Rochelle tuzu ve kuvars uzun zamandır tek-kristal piezoelektrik madde olarak bilinmesine rağmen esas olarak nispeten Rochelle tuzunun zayıf kristal stabilitesi ve kuvarsın sınırlı serbestlik derecesiyle sınırlı bir uygulama aralığına sahip olmuşlardır. Daha sonra, bir piezoelektrik seramik olan baryum titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) ultrasonik uygulamalar için tanıtılmış, daha yakın zamanlarda, elektromekanik dönüştürme verimliliği ve kararlılığına sahip, kurşun titanat, kurşun zirkonat sistemi ( $\text{PbTiO}_3$  .  $\text{PbZrO}_3$ ) ortaya çıkmıştır. Bu durum piezoelektrik seramiklerin uygulama alanını önemli ölçüde genişletmiştir. Belirli bir şekle sahip bir piezoelektrik seramiğe (piezoelektrik dönüştürücü) değişen frekansta bir AC voltajı uygulanırsa, seramiğin çok güçlü bir titreşim ürettiği belirli bir frekans olduğu görülebilir. Bu frekansa rezonans frekansı  $f_r$  denir ve malzemenin şeklinin bir fonksiyonu olan seramiğin spesifik elastik titreşim (rezonans) frekansına bağlıdır. Tablo 1'de gösterildiği gibi radyal modlu piezoelektrik malzeme sabiti sembolleri anlamları şu şekildedir. N: Frekans sabiti, d: Piezoelektrik distorsiyon sabiti, g: Voltaj çıkış sabiti, k: Elektromekanik kuplaj katsayısı,  $Y^E$ : Esneklik sabitinin tersi,  $\epsilon^T$ : Dielektrik sabiti olmak üzere;

Bir piezoelektrik malzeme T stresine maruz kaldığında,  $P = dT$ 'nin (d : piezoelektrik gerinim sabiti) lineer bir fonksiyonu olan polarizasyon P üretir. Bu etkiye normal piezoelektrik etki denir. Tersine, bir piezoelektrik madde elektrotları boyunca uygulanan bir E elektrik alanına sahip olduğunda, elektrik alanın lineer bir fonksiyonu olan bozulma S üretir ve  $S = dE$ 'dir. Bu etkiye ters piezoelektrik etki denir. Elastik bir malzeme için S ile T arasındaki ilişki  $S = s^E T$  'dir. Burada  $s^E$  sebep olan kuvvetin bir fonksiyonu olarak ifade edilen elastik cisim gerinimidir. Dielektrik bir madde için, elektriksel yer değiştirme D ile elektrik alan şiddeti E arasındaki ilişki  $D = \epsilon E$  ile verilir. Bir piezoelektrik seramik için bu ilişkiler, her ikisi de piezoelektrik gerinim sabitleriyle ilişkili olan aşağıdaki denklemlerle verilir:

**Tablo 1.** Radyal modlu piezoelektrik malzeme sabiti sembolleri [24]

Titreşim Modu	Biçim/Titreşim Modu	Rezonans Frekansı (fr)	Malzeme Sabiti Sembolü					
			k	d	g	$Y^E$	$\varepsilon^T$	N
Radyal Mod	 <p>P: Polarizasyon Yönü E: Elektrik Alan Yönü Radyal titreşim modlu ince disk. Polarizasyon disk kalınlığı boyunca yönlendirilir.</p>	$\frac{Np}{d}$	kp	$d_{31}$	$g_{31}$	$Y_{11}^E$	$\varepsilon_{33}^T$	Np

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_n = d_{nj} T_j + \varepsilon_{nm}^T E_m \quad (2)$$

$(m, n = 1, 2, 3; i, j = 1, 2, \dots, 6)$

Denklemlere temel piezoelektrik denklemler (d tipi) denir, burada elektrik alan E ve elektriksel yer değiştirme D vektör büyüklüklerinde temsil edilir; oysa gerilme T ve bozulma S simetrik gerilme büyüklüklerinde verilmiştir. Kristallerin simetrisi dikkate alındığında denklem basitleştirilmiştir. Çünkü denklemlerdeki bazı sabitler sıfırlanır ve diğer bazı sabitler üçüncü bir sabitler grubuna eşit olur. Piezoelektrik seramiklerde, polarizasyon eksen z (3) eksen ve iki gelişigüzel ortogonal eksen (bunlar da z eksenine diktir ve x (1) ve y (2) eksen olduğu varsayılır) boyunca yerleştirildiğinde, kristal seramiğin yapısı 6 mm kristallerinkiyle aynı şekilde temsil edilebilir, bu durumda tek bağımsız sıfır olmayan katsayılar aşağıdaki on sabittir:

$$s_{11}^E \left( \frac{1}{Y_{11}^E} \right), s_{12}^E \left( \frac{1}{Y_{12}^E} \right), s_{13}^E \left( \frac{1}{Y_{13}^E} \right), s_{33}^E \left( \frac{1}{Y_{33}^E} \right), s_{44}^E \left( \frac{1}{Y_{44}^E} \right), \quad (3)$$

$$d_{31}, d_{33}, d_{15}, \varepsilon_{11}^T, \varepsilon_{33}^T$$

Örneğin, dikdörtgen bir seramik şeridin uzunlamasına titreşimi için temel piezoelektrik denklemler aşağıdaki denklemlerle verilir:

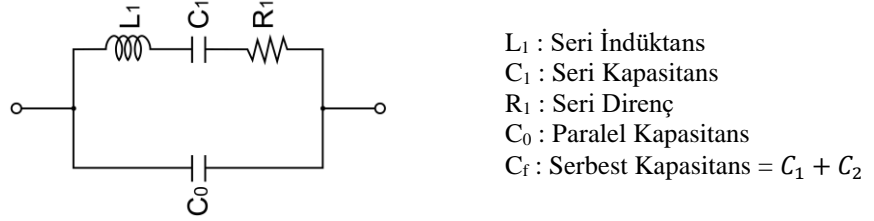
$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (4)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (5)$$

Bir piezoelektrik seramik dönüştürücü, titreşim modunu temsil eden temel piezoelektrik denklemlerinden türetilen bir eşdeğer devre ile temsil edilebilir. Devre, Maison'un eşdeğer devresi olarak adlandırılır. Daha genel olarak, Şekil 1'de gösterilen eşdeğer devre, bir piezoelektrik seramiği temsil etmek için kullanılabilir. Bu eşdeğer devrede, seri rezonans frekansı  $f_s$  ve paralel rezonans frekansı  $f_p$  aşağıdaki denklemlerle verilir. Elektromekanik kuplaj katsayısı k'yi belirlemek için sabitler  $f_s$  ve  $f_p$  gereklidir.

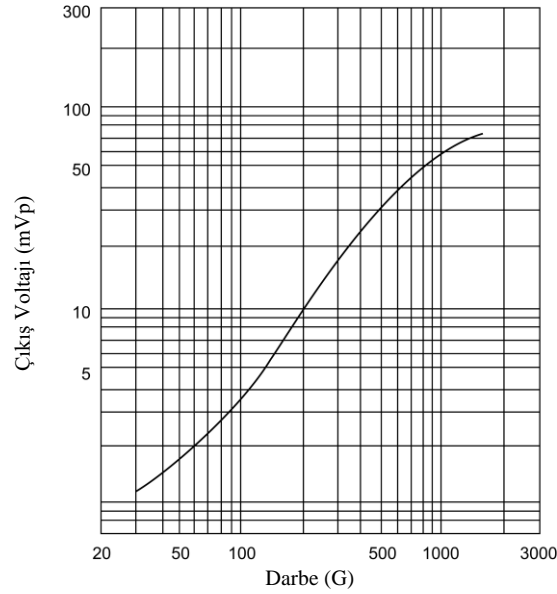
$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (6)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}} \quad (7)$$



Şekil 1. Piezoelektrik Seramik Dönüştürücü için Eşdeğer Devre [24]

Makaleye konu olan piezoelektrik seramik dönüştürücü, maruz kaldığı bir darbenin veya titreşimin ivmesiyle orantılı bir voltaj üretir. Şok sensörü çarpma enerjisini orantılı bir elektrik sinyaline dönüştürmek için piezoelektrik seramik kullanır. Piezoelektrik şok sensörü, metal bir diske lamine edilmiş bir piezoelektrik seramik diskten oluşan "tek biçimli" bir diyafram kullanır. Çıkış gerilimi ve darbe tepkisi Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Darbe dalgası 1/2 sinüs dalgası iken çıkış voltajı, çarpmanın ivmesiyle neredeyse orantılıdır.”[24]

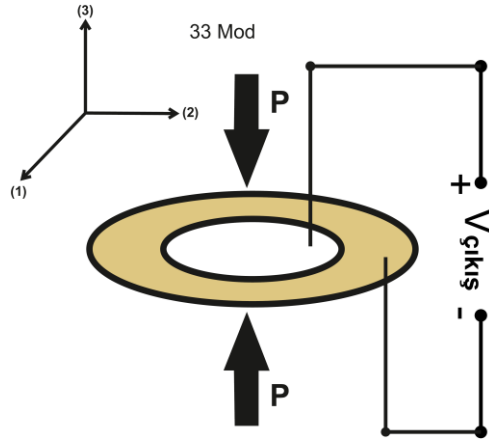


Şekil 2. Çıkış gerilimi ve darbe tepkisi [24]

### 3. Materyal ve Metod

Titreşimden ve/veya uygulanan basınçtan elektrik enerjisi üreten piezoelektrik seramik dönüştürücülerle ilgili giderek daha fazla çalışmalar yapılmaktadır. Okullarda zemine yerleştirilen piezoelektrik seramik dönüştürücülerle elektrik enerjisi elde etmek amacıyla yapılan bu çalışmada deney düzeneğinin zeminini oluşturmak için  $200 \times 300 \times 18$  mm ölçülerinde MDF kullanılmıştır. MDF, enerji hasadı için kullanılacak piezoelektrik malzemenin ve enerji hasat devresinin montajı için  $200 \times 90 \times 18$  mm ölçülerinde MDF ile iki tarafından yükseltilmiştir.

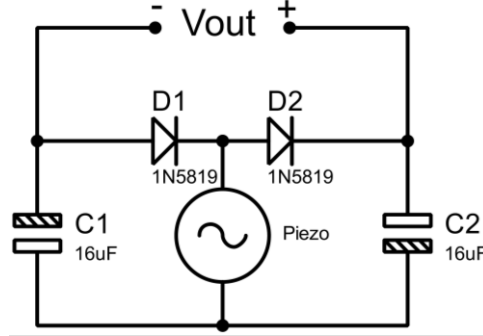
Piezoelektrik malzemeye uygulanan basınç yönüne göre kuplaj modu Şekil 3’te gösterildiği gibidir. Bu çalışmada piezoelektrik dönüştürücüye uygulanan basınç dik olduğu için d33 modunda çalışmaktadır.



Şekil 3. Piezoelektrik malzemeye uygulanan basınç yönüne göre kuplaj modu

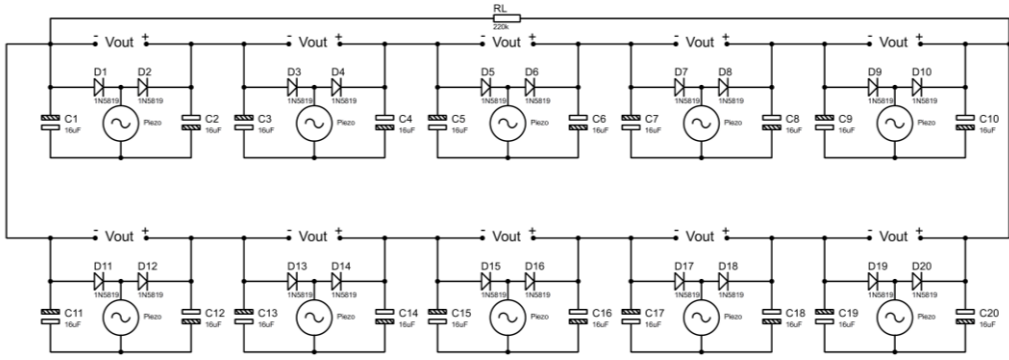
### 3.1. Arayüz devresi

PZT'lerin doğrudan seri veya paralel bağlantısı, birden fazla PZT içeren bir enerji toplayıcıda üretilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için uygun bir strateji değildir[25]. Üretilen akım doğru akıma çevrilmek istendiğinde kullanılan yöntemlerden en yaygın olanı dört diyotlu köprü tipi tam dalga doğrultma devreleridir. Bu yöntemde her alternansta iki diyot akımı taşıdığından diyotlar üzerinde gerilim kayıpları oluşur. Bu yüzden birden fazla PZT'nin elektriksel bağlantısına çözüm sunan, her alternansta sadece bir diyot üzerinde gerilim düşen, gerilim kaybı az bir devre topolojisi kullanılmıştır. Bu işlem gerilim ikileyicilerle gerçekleştirilmiştir. Gerilim ikileyicilerin her biri iki adet 1N5819 schottky diyot ve iki adet 16  $\mu$ F 63 V kondansatör ile oluşturulmuştur. 1N5819 schottky diyotun ileri voltaj düşümü ( $V_F$ )  $I_F=0,1A$  iken 0,34V'tur. Bu sayede ileri voltaj düşümü yaklaşık 0,7V olan diyotlara göre avantaj sağlanarak, voltaj kaybı en az değere indirilmiştir. Şekil 4'te gerilim ikileyici devre şeması görülmektedir.



Şekil 4. Gerilim ikileyici devre şeması

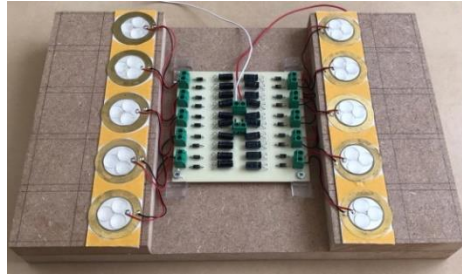
PZT'ler alternatif akım üretirler. Pozitif alternansta D2 diyotu iletme geçer. Bu durumda C2 kondansatörü şarj olur. Sadece D2 diyotu üzerinde gerilim düşümü olur, voltaj kaybı oluşur fakat pozitif alternanstaki voltaj kaybı tek diyotla sınırlıdır. Negatif alternansta D1 diyotu iletme geçer. Bu durumda C1 kondansatörü şarj olur. Sadece D1 diyotu üzerinde gerilim düşümü olur, voltaj kaybı oluşur fakat negatif alternanstaki voltaj kaybı da tek diyotla sınırlıdır. Ölçümlerde kullanılan piezoelektrik enerji hasat devresinin nasıl modellendiği Şekil 5'te gösterilmiştir. Devreye Kirchoff'un gerilimler kanunu uygulandığında RL yükü üzerindeki toplam gerilim, seri bağlı gerilim ikileyicilerinin üreteceği gerilimlerin toplamına eşit olacaktır.



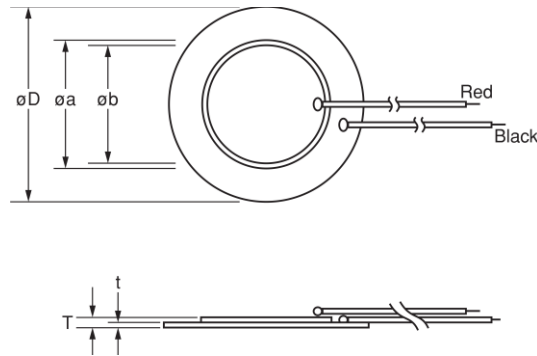
Şekil 5. Piezoelektrik dönüştürücülerin elektriksel bağlantısı

### 3. 2. Deney düzeneği

Deneyel çalışmada 10 adet 35mm çapında piezoelektrik malzeme satın alınarak kullanılmıştır. Bunlardan 5 tanesi deney düzeneğinin 200 mm'lik kenarı boyunca eşit aralıklarla dizilmiştir. 5 adet piezoelektrik malzeme ayrı ayrı 5 adet gerilim ikileyiciye bağlanmıştır ve 5 adet gerilim ikileyici birbirine seri olarak bağlanmıştır. Sonunda bu iki devre paralel bağlanarak Şekil 6'daki deney düzeneği elde edilmiştir. Şekil 7'de Murata firmasına ait 7BB-35-3L0 piezoelektrik malzemenin teknik verileri gösterilmiştir.



Şekil 6. PZT dizilimi ve piezoelektrik enerji hasat devresi



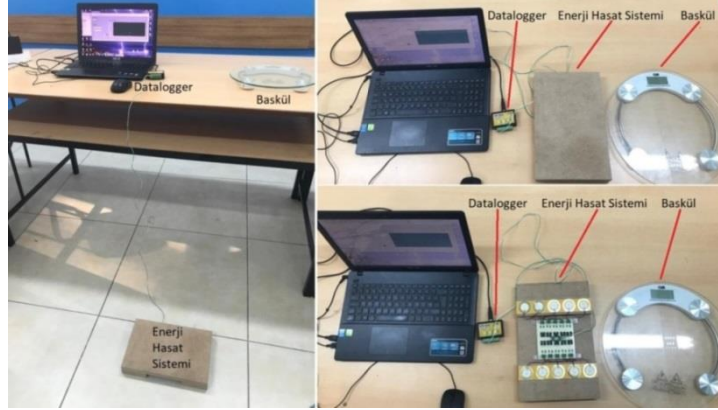
Ürün Adı	Plaka Çapı D (mm)	Element Çapı a (mm)	Elektrot Çapı b (mm)	Kalınlık T (mm)	Plaka Kalınlığı t (mm)	Plaka Malzemesi
7BB-35-3L0	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Pirinç

Şekil 7. 7BB-35-3L0 piezoelektrik malzemenin teknik verileri [26]

Deney düzeneğinin üzerine basıldığında piezoelektrik malzemelerin zemine tam olarak etki edebilmesi için üzerlerine 3 mm yüksekliğinde silikon malzemeler yapıştırılmıştır. Böylece deney düzeneğine etki edecek dikey kuvvetin piezoelektrik malzemelere eşit olarak dağıtılması amaçlanmıştır.

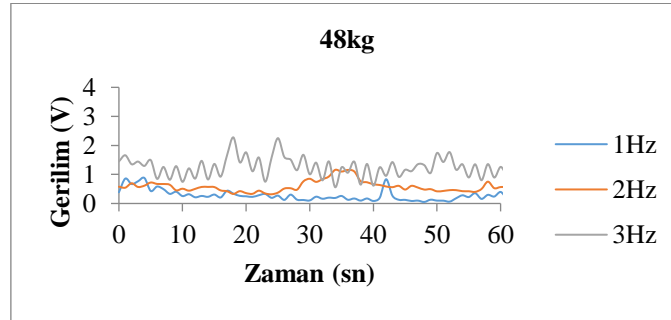
#### 4. Deneyle

Şekil 8’de tasarlanan PEH ve deneysel kurulum gösterilmiştir. Sunulan PEH 48 kg, 58 kg, 71 kg, 85 kg ağırlık ve her biri için 1-2-3 adım/saniye adım sıklıklarında test edilmiştir. Adım sıklığı senkronizasyonu sanal metronom ile gerçekleştirilmiş, adım atanın metronomun frekansına uyması sağlanmıştır. Her bir ölçüm 60 sn boyunca alınmış ve datalogger kullanılarak kaydedilmiştir. Yük olarak 220 K $\Omega$  direnç kullanılmıştır.

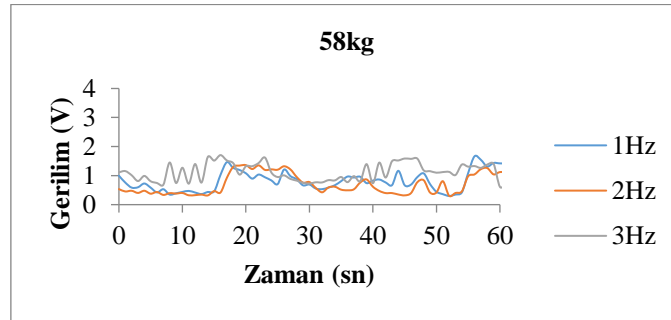


Şekil 8. Tasarlanan PEH ve deneysel kurulum

Deney düzeneğinin 48 kg, 58 kg, 71 kg ve 85 kg ağırlığındaki bireylerin yürüme hareketleriyle oluşturduğu çıkış voltajına ait grafikler sırasıyla Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Tablo 2’de hasat edilen anlık maksimum gerilimler ve hesaplanan anlık maksimum güçler gösterilmektedir.

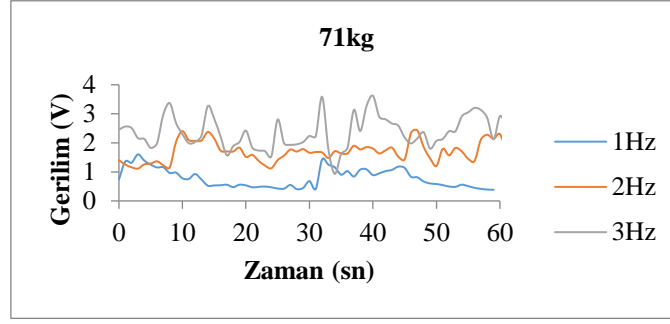


Şekil 9. 48 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye’deki PEH çıkış voltajı

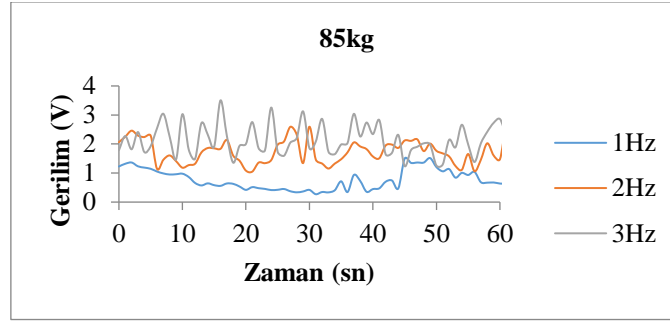


Şekil 10. 58 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye’deki PEH çıkış voltajı





Şekil 11. 71 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye'deki PEH çıkış voltajı



Şekil 12. 85 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye'deki PEH çıkış voltajı

Tablo 2. PEH maksimum çıkış voltajları ve güçleri

Test Ağırlığı (kg)	Yürüme Hızları (adım/saniye)	Hasat edilen maksimum gerilim (V)	Hasat edilen maksimum güç ( $\mu$ W)
48	1	0,87	3,44
	2	1,30	7,68
	3	2,27	23,42
58	1	1,66	12,53
	2	1,36	8,41
	3	1,70	13,14
71	1	1,60	11,64
	2	2,42	26,62
	3	3,62	59,57
85	1	1,51	10,36
	2	2,59	30,49
	3	3,50	55,68

## 5. Sonuç

Bu çalışmada ağırlıkları farklı dört birey, oluşturulan deney düzeneği üzerinde üç farklı hızda yürümüş ve enerji hasadı yapılmıştır. Anlık olarak üretilen maksimum gerilimlerde aynı bireyin adım hızı arttıkça hasat edilen gerilimin maksimum değerinin de arttığı görülmüştür. Aynı bireyin adım hızı arttıkça hasat edilen anlık gerilimlerin ortalama değerinin önemli ölçüde arttığı değerlendirilmiştir. Anlık gerilimlerin ortalamasına bakıldığında 48 kg birey için 1-2-3 adım/saniyede 0,27 V-0,58 V-1,25 V, 58 kg için 0,79 V-0,68 V-1,13 V, 71 kg için 0,78 V-1,68 V-2,35 V, son olarak 85 kg için 0,77 V-1,71 V-2,12 V hesaplanmıştır.

Bu çalışmada PZT'nin ürettiği gerilimin her alternansında hasat tek bir diyot ile sağlanmış, ileri voltaj düşümü ( $V_F$ )  $I_F=0,1A$  iken  $0,34V$  olan schottky diyot seçilmiş, diyot voltaj kaybı en aza indirilmiştir. Bu sayede verimlilik artırılmıştır.

Çalışma, PZT'ye uygulanan dört farklı ağırlık ve üç farklı yürüme hızının enerji hasadına etkisini göstermesi açısından özgün ve yapılacak diğer araştırmalara örnek olacak niteliktedir. Ayrıca önerilen deney düzeneğinin seri ve/veya paralel bağlantılarla birden fazla kullanılması durumunda hasat edilecek toplam akım ve gerilimin artırılması değerlendirilebilir.

### Kaynaklar

- [1] Zhang B., Liu H., Zhou S. et al. A review of nonlinear piezoelectric energy harvesting interface circuits in discrete components. *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 2022; 43: 1001-1026.
- [2] Akkaya Oy S. A design of mass-spring type piezoelectric energy harvesting. *Scientia Iranica D* 2021; 28(6): 3504-3511.
- [3] Li C., Yang F., Liu P., Fu C., Liu Q., Zhao H., Lin P. Development and Piezoelectric Properties of a Stack Units-Based Piezoelectric Device for Roadway Application. *Sensors* 2021; 21: 7708.
- [4] Cho J. Y., Kim K. B., Hwang W. S., Yang C. H., Ahn J. H., Do Hong S., ... & Sung T. H. A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system. *Applied Energy* 2019; 242: 294-301.
- [5] Jeon D. H., Cho J. Y., Jhun J. P., Ahn J. H., Jeong S., Jeong S. Y., ... & Sung T. H. A lever-type piezoelectric energy harvester with deformation-guiding mechanism for electric vehicle charging station on smart road. *Energy* 2021; 218: 119540.
- [6] Shenck N., Paradiso J. Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezo-Electrics. *IEEE Micro* 2001; 21(3): 30-42.
- [7] Nimachwala A., Pandya A. Energy harvesting in the form of electricity by Piezo-Cells by placing them in a pair of shoes and storing energy in Power Bank. *Materials Today: Proceedings* 2022; 67(1): 51-55.
- [8] Wang J. X., Li J. C., Su W. B., Zhao X., Wang C. M. A multi-folded-beam piezoelectric energy harvester for wideband energy harvesting under ultra-low harmonic acceleration. *Energy Reports* 2022; 8: 6521-6529.
- [9] Yang Kuang, Tingwen Ruan, Zheng Jun Chew, Meiling Zhu, Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node. *Sensors and Actuators A: Physical* 2017; 254: 69-77.
- [10] Frontoni E., Mancini A., Zingaretti P., Gatto A. Energy harvesting for smart shoes: A real life application. *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2013. 4. 10.1115/DETC2013-12310. American Society of Mechanical Engineers.*
- [11] Starner T. Human Powered Wearable Computing. *IBM Systems J.* 1996; 35: 618-629.
- [12] Rocha J. G., Goncalves L. M., Rocha P. F., Silva M. P., Lanceros-Mendez S. Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2010; 57: 813-819
- [13] Iswanto, Sripto S., Mujahid F., Putra K.T., Apriyanto N.P., Apriani Yosi. Energy Harvesting on Footsteps Using Piezoelectric based on Circuit LCT3588 and Boost up Converter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2018; 8: 4104-4110.
- [14] Boutaldat M., Chakhchaoui N., Eddiai A., Meddad M., Cherkaoui O., Rguiti M., Mazroui M. H. Modeling and electromechanical performance analysis of polyvinylidene difluoride/textile-system for energy harvesting from the human body toward a novel class of self-powered sensors. *Polymers for Advanced Technologies* 2022; 33:.
- [15] Lim C. H., NajibAl-Fadhali, Majid H., Gismalla M., Mukred J. A. A., Najmaddin Abo Mosali. Footstep power generation using piezoelectric transducers. *Progress in Engineering Application and Technology* 2022; 3(1): 454-469.
- [16] Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., Gershenfeld N. Parasitic power harvesting in shoes. *Digest of papers. Second international symposium on wearable computers (Cat. No. 98EX215)* 1998; :132-139.
- [17] Apriyanto N. P., Firmansyah E., Putranto L. M. Piezoelectric Energy Harvester for IoT Sensor Devices. *IJITEE (International Journal of Information Technology and Electrical Engineering)* 2021; 5(4): 124-129.
- [18] Qian F., Xu T. B., Zuo, L. Piezoelectric energy harvesting from human walking using a two-stage amplification mechanism. *Energy* 2019; 189: 116140.
- [19] Deng F., Cai Y., Fan X., Gui P., Chen, J. Pressure-type generator for harvesting mechanical energy from human gait. *Energy* 2019; 171: 785-794.
- [20] Zhong X., Wang H., Chen L., Guan M. Design and Comparative Study of a Small-Stroke Energy Harvesting Floor Based on a Multi-Layer Piezoelectric Beam Structure. *Micromachines* 2022; 13(5): 736.
- [21] Song G. J., Cho J. Y., Kim K. B., Ahn J. H., Song Y., Hwang W., Hong S. D., Sung T. H. Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications. *Applied Energy* 2019; 256: 113916.
- [22] Wang W., Cao, J., Bowen, C.R., et al. Optimum resistance analysis and experimental verification of nonlinear piezoelectric energy harvesting from human motion. *Energy* 2017; 118: 221-230.
- [23] Türkmen A.C., Çelik C. Energy harvesting with the piezoelectric material integrated shoe. *Energy* 2018; 150: 556-564.
- [24] Murata Manufacturing Co., Ltd., P19E7.pdf 02.6.26: 2-4.
- [25] Akkaya Oy S. A piezoelectric energy harvesting from the vibration of the airflow around a moving vehicle. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2020; 30(12): e12655.
- [26] Murata Manufacturing Co., Ltd., P37E.pdf.