



PEHDs ile Temiz Enerji Üretimi ve Çevresel Sürdürülebilirlik için Önemi

Gülnihal KARA^{1*}, Tuğba USTA¹

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 42075 Kampus, Konya, Türkiye

E-Posta: gkara@ktun.edu.tr, tugbausta06@gmail.com

Gönderim 19.02.2025; Kabul 30.11.2025

Özet: Elektrik, günümüz toplumunda temel enerji sağlayıcıdır ve sürdürülebilir gelecekte hayati rol oynamaktadır. Güneş veya rüzgâr enerjisi gibi temiz ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik, daha az sera gazı emisyonu (GHG) kaynağıdır. Gelecekte artan talebi karşılama ve emisyonları azaltmada çevredeki farklı kaynaklardan elektrik üreten enerji hasadı teknolojileri ile güneş ve rüzgâr enerjisi gibi doğal kaynakları kullanan yenilenebilir enerji sistemlerinin entegre edildiği bütüncül enerji politikaları önemli rol oynayacaktır. Piezoelektrik enerji hasadının, özellikle güneş, rüzgâr vb doğal yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılamayan metro, alışveriş merkezleri (AVM) vb. iç ortamlarda kullanımı modern yapı vizyonunda dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin kurulduğu basamak ise özellikle yüksek doluluk ve yoğunluğa sahip alanlarda iç ortam enerji üretimi için en umut vericisidir.

Bu çalışma da piezoelektrik teknolojinin temel kavramları sunuldu, enerji tüketimi ve emisyon salınımına önemli katkı sağlayan başta metro vb iç ortamlardaki yürüyen merdivenlerde olmak üzere birçok sektöre entegre edilebilir piezoelektrik enerji hasat sistemleri (PEHDs) içeren hareketli basamak tasarlandı, güç üretim kapasitesi, yatırım maliyeti, ekonomik verimliliği incelendi. Sonuçlar klasik sistem ile piezo sistemin mekanik kurulum maliyetlerinin benzer olduğunu gösterdi. Hesaplamalar, 20 basamaklı yürüyen merdivenin %75 dolulukta enerji gereksiniminin ilave enerjiye gereksinim olmadan PEHDs basamak ile karşılanabildiğini gösterdi. Ayrıca klasik sisteme göre (yılıda 18250 kWh enerji tüketimi), piezo sistemin (disklerin kullanım ömrü süresince, sıfır işletme maliyeti) hem temiz/sürdürülebilir hem de ekonomik enerji kaynağı olarak kullanılabileceğini gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Karbon Emisyonunun Azaltılması, Elektrik Üretimi, Enerji Hasadı, Piezoelektrik Basamak, Sürdürülebilirlik, Metro.

Clean Energy Generation with PEHDs and Its Importance for Environmental Sustainability

Received 19.02.2025; Accepted 30.11.2025

Abstract: In today's world, electricity is a fundamental energy resource and is important to a sustainable future. Electricity produced from clean and renewable sources such as solar or wind energy is a source of lower greenhouse gas emissions. Holistic energy policies that integrated renewable energy systems using natural resources such as solar and wind energy with energy collection technologies that generate electricity from various environmental sources, will play an important role in meeting the increasing demand in the future and reducing emissions. Piezoelectric energy harvesting is regarded as an innovation in the modern constructions, particularly in indoor environments like subway lines, malls, etc., where natural renewable energy sources cannot be utilized. The step where piezoelectric energy harvesting systems (PEHDs) are installed is one of the most promising for indoor power generation, especially in areas with high occupancy and crowds. In this study, the fundamental concepts of piezoelectric technology were presented. A movable PEHDs step was designed that can be integrated into many sectors, primarily in escalators in indoor environments, which significantly contribute to energy consumption and emission release, and their power production capacity, cost of construction, and economic efficiency were examined. The results showed that the mechanical construction costs of the piezo system are similar to those of the classic system. According to calculations, the energy requirement of a 20-step escalator at 75% occupancy could be met by the PEHDs step without the need for additional energy. In addition, compared to the classic system (with an annual energy consumption of 18250 kWh), the piezo system (\$0 operating costs during the disks' lifetime) is both a clean/sustainable and economic energy source.

Key Words: Reduction of Carbon Emission, Electricity Generation, Energy Harvesting, Piezoelectric Step, Sustainability, Subway.

GİRİŞ

Artan nüfus beraberinde enerjiye duyulan ihtiyacı da arttırdı. Enerji, modern

*İlgili E-posta / Corresponding E-mail: gkara@ktun.edu.tr (ORCID: 0000-0002-8077-0464)

toplumların gelişiminde kritik bir rol oynar. Enerji verimliliği, enerji üretim teknolojilerinin çevresel performansının iyileştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve daha temiz teknolojilerin kullanımı çevresel sürdürülebilirliğin temel unsurlarıdır [1,2]. Elektrik, günümüzde başlıca enerji kaynağıdır ve bu yüzden küresel çevresel etkilere katkısı sürdürülebilirlikte önemli rol oynar [3]. Dünya genelinde 2024 yılında, küresel elektrik arzının %80'i yenilenebilir kaynaklar ve nükleer enerji tarafından sağlanırken, 2050 yılına kadar, neredeyse %90'ının yenilenebilir kaynaklardan sağlanacağı tahmin edilmektedir [4, 5]. Enerji tüketimi ise hızla artmaktadır. Dünya Enerji Görünümü (WEO) [6] , 2020'de 600 katrilyon BTU olan enerji tüketiminin 2050'de 800 katrilyon BTU'yu aşacağını raporladı. Ülkemizde ise birincil enerji üretimi (Üretim-2022 yılında 1.281 katrilyon BTU) ihtiyacı (2022 yılı tüketim 6.025 katrilyon BTU) karşılayamamaktadır [6]. Ayrıca, gelecekte iklim değişikliği yüzünden hidroelektrik enerjinin kullanımının ve fosil kaynakların azalacağı öngörülmektedir. Üstelik sera gazı azaltımlarına yönelik hedefler-taahhütler, iklim değişikliği odaklı politikalar gelecekte Türkiye'nin artan talebi karşılamasını daha da zorlaştıracaktır. Geleneksel enerji santrallerinde fosil yakıtlardan elektrik üretimi, hem maliyetlidir hem de antropojenik GHG emisyonlarının birincil kaynaklarından [1]. Üretiminden tüketim aşamasına kadar çevre üzerinde olumsuz birçok etkiye neden olur ve bu talebi karşılamak için yalnızca bu enerji kaynaklarının kullanımı, atmosfere daha fazla CO₂ gazı salınımına ve küresel sıcaklıklarda artışa neden olacaktır. Ayrıca termik santraller gibi fosil yakıtlardan enerji üretiminin maliyeti yenilenebilir enerji kaynakları ile kıyaslandığında daha fazladır [7]. Enerji maliyetlerinde ve çevre sorunlarındaki artış, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgiyi arttırdı ve bu kaynaklardan enerji üretimi yaygınlaştı. Üstelik güneş veya rüzgâr enerjisi gibi temiz ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik, daha az sera gazı emisyonu üretmektedir [8]. Doğal kaynakları kullanan yenilenebilir enerji sistemlerine ek olarak, insan faaliyetlerinden kaynaklanan atık mekanik enerji gibi çevredeki farklı kaynaklardan elektrik üreten enerji hasadı teknolojilerine iklim değişikliği, kaynak kıtlığı vb çevre sorunları yüzünden son yıllarda ilgi daha da arttı. Bu teknolojilerden biri de mekanik basınca maruz bırakıldığında elektrik üretebilen piezoelektrik malzemelerdir.

Piezoelektrik malzemeler ile çevredeki mekanik enerji kaynaklarından (araçlar, yayalar, binalar vb) elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Bu kaynaklar ile oluşan mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu malzemeler mekanik basıncı elektrik sinyaline dönüştürür. Üstelik bu dönüşüm de herhangi atık üretilmez. Mevcut sistemlere entegre edilerek enerji kaybı minimize edilebilir ve sistemlerin daha verimli çalışması sağlanabilir. Endüstriyel tesislerde ise atık mekanik enerji (makine titreşimleri vb.) piezoelektrik malzemelerle elektriğe dönüştürülebilir. Ayrıca bu malzemeler ile taşınabilir cihazlar için sürdürülebilir enerji kaynağı sağlamak da mümkündür. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilerek (rüzgâr türbinlerindeki titreşimler, güneş panellerindeki basınç, hidroelektrik santrallerdeki su basıncı elektrik enerjisine çevrilerek) mevcut elektrik üretimi artırılabilir. Bu çalışma da piezoelektrik teknolojisi ile doğal yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılamayan iç ortamlarda sürdürülebilir enerji üretimine olanak sağlayacak birçok sektöre entegre edilebilir hareketli PEHDs basamak tasarlandı. Bu tasarlanan sistemin güç üretim kapasitesi, yatırım maliyeti, ekonomik verimliliği incelendi.

Piezoelektrik Teknolojisinin Temel Kavramları

Piezoelektrik malzemeler elektrik üreticisi olarak tanımlanır ve ferroelektrik adı verilen geniş bir malzeme sınıfındandır [9]. Kuvars (SiO₂), Baryum titanat (BaTiO₃), Kurşun zirkonyum oksit/kurşun titanyum oksit (PbZrO₃-PbTiO₃) alaşımı (PZT), Poliviniliden Florür (PDVF) piezoelektrik malzemelere verilebilecek örneklerdir.

Piezoelektrik malzemelerin bir kısmı doğada doğal halde (rochelle tuzu, kuvars) [10] bulunabildikleri gibi BaTiO₃ gibi sentetik, PVDF gibi polimer esaslı olarakta üretilmektedir [11,12]. Sentetiklerin piezoelektrik üretme yeteneği yüksektir ve farklı uygulamalara kolaylıkla adapte edilebilirler [13]. Kolay ve ucuz üretilirler ve farklı geometri veya büyük hacim gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Piezoelektrik malzemelere katkı maddeleri ilave edilerek sert/yumuşak özellik kazandırılmaktadır. Bor, karbon, nitrojen ve silisyum'un oksit içermeyen türlerin (seramik) dayanıklılığı, sıcaklık ve aşınmaya karşı direnci yüksektir [14]. Piezoelektrik malzemelerin sıcaklık, elektrik ve mekanik gerilim sınır değerleri mevcuttur. Bu sınır değerler aşıldığında piezoelektrik malzeme özelliklerini zamanla kaybederler. Bu olay "yaşlanma" olarak nitelenir. Bu malzemeler kullanıldığında sıcaklık, Curie sıcaklığının altında olmalıdır. Curie sıcaklığı veya diğer bir tanımla Curie noktası, manyetik maddenin, kalıcı mıknatıslığını kaybettiği ve paramanyetik duruma geçtiği kritik sıcaklıktır. Malzemelerin piezoelektrik özellikleri sıcaklık ile ters orantılı değişir. Bu malzemeler, kutuplandıkları gerilimin zıt yönünde elektriksel alanda tutulduklarında kutuplarını kaybedebilir. Tablo 1'de bilinen piezoelektrik malzemelerin oda sıcaklığındaki dielektrik sabitleri verilmiştir.

Tablo 1. Bilinen piezoelektrik malzemelerin oda sıcaklığındaki dielektrik sabitleri [15]

	Dielektrik Sabitleri	
Amonyum Dihidrojen Fosfat (NH ₄ H ₂ PO ₄)	(d ₃₆)	50
Baryum Sodyum Niyobat (Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅)	(d ₂₄)	52
Baryum Titanat (BaTiO ₃)	(d ₁₅)	392
Etilen Diamin Tartarat (C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₆)	(d ₂₃)	-12.3
Kurşun Baryum Niyobat (PbBa _{1/3} Nb _{2/3} O ₃)	(d ₁₅)	108
Kurşun Potasyum Niyobat (Pb ₂ KNb ₅ O ₁₅)	(d ₁₅)	470
Kurşun Niyobat (PbNb ₂ O ₆)	(d ₃₃)	44
Kurşun Zirkonat Titanat (Pb(Zr _{0,52} Ti _{0,48})O ₃)	(d ₁₅)	750
Lityum Niyobat (LiNbO ₃)	(d ₁₅)	68
Lityum Sülfat (LiSO ₄ .H ₂ O)	(d ₂₂)	16.2
Lityum Tantalat (LiTaO ₃)	(d ₁₅)	26
Kuvarz (SiO ₂)	(d ₁₁)	2.3
Potasyum Dihidrojen Fosfat (KH ₂ PO ₄)	(d ₃₆)	23.2
Rochelle tuzu (NaKC ₄ H ₄ O ₆ .4H ₂ O)	(d ₁₄)	2300
Sodyum klorat (NaClO ₃)	(d ₁₄)	1.7
Triglisin Sülfat (TGS) ((NH ₂ CH ₂ COOH) ₃ .H ₂ SO ₄)	(d ₂₃)	25.3
Turmalin (CaAl ₃ Mn ₆ (BO ₃) ₃ (SiO ₃) ₆₄)	(d ₁₅)	3.6
Çinko sülfür (ZnS)	(d ₃₃)	3.2

Örneğin PZT için d₃₃=750 (10⁻¹² C/N)'dur. Bu PZT'ye 1 Newton kuvvet uygulandığında 750.10⁻¹² coulomb elektrik ürettiği anlamına gelir. Dielektrik sabiti yükseldikçe enerji hasadı da artar [16]. Elektrik üretebilmeleri için bu malzemelerin üzerine mekanik basınç uygulanır. Bu "doğrudan ya da motor piezoelektrik etki" olarak tanımlanır. "Ters ya da üreteç piezoelektrik etki" ise; elektriksel alanın şiddetine göre bu malzemelerin uzayıp kısalabildiği, şekil değişikliklerinin meydana geldiği durumdur. Tablo 2'de piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları sunulmuştur.

Tablo 2. Piezoelektrik malzemelerin uygulama alanları [17]

Doğrudan Piezoelektrik Etki		Ters Piezoelektrik Etki	Her iki etki
Sensörler	Üreteç	Titreşim azaltma	Ultrasonik sonar cihazları
Hızlandırıcılar	Yüksek voltaj kıvılcım ateşleyicileri	Nano konumlandırma	Mesafe ölçüm cihazları
Vuruş sensörleri	Enerji hasadı	Tekstil makine fanları	Ultrasonik malzeme karakterizasyonu
Basınç/kuvvet sensörleri	Zil yapıdaki dönüştürücüler ile enerji hasadı	Ultrasonik motorlar	Transformatörler
Dinamik gerilme sensörleri	Zil yapıdaki dönüştürücüler ile enerji hasadı	Hoparlörler, yakıt enjektörleri	Ultrasonik cihazlar

PEHDs, mekanik basınç kaynaklı deformasyonda (hem sıkıştırma hem de serbest kalma) elektrik üretebilen piezoelektrik katmanlar içerir. Birçok sektör de (inşaat, mimari, elektronik vb.) bu teknolojilerdeki önemli gelişmelerden faydalanmaktadır. Örneğin, pilot ölçekli asfalta yerleştirilen PEHDs ile araç lastikleri ile oluşan mekanik basınç toplanarak [18] ve sırt çanta askılarına yerleştirilen PVDF fiber ile kalp, akciğer ve diyafram gibi doğal kasılma ve gevşeme hareketlerine sahip organlardan enerji üretilmiştir [19,20]. Ancak, yüksek yatırım maliyeti, ekonomik verimlilik ve kullanım ömrü gibi faktörler yüzünden kullanımı sınırlıdır [8,21]. Ancak çevresel açıdan, PEHDs donatılmış basamak vb. enerji toplama teknolojileri umut verici inovasyon sistemlerindedir ve geliştirilmeleri teşvik edilmektedir. Çünkü ekstra arazi alanı gerektirmezler [22], sıfır gürültü [23] ve GHGs emisyonları ile küresel enerji sorunları için bir çözüm olarak kabul edilmektedir. EPA 1 km'lik asfalta döşenen PEHDs'in saatte 53 kg CO₂ eşdeğeri bir azaltıma katkıda bulunabileceğini raporladı [23]. Sıfır emisyonlu enerji üretimi, küresel iklim değişikliğini azaltmaya da katkı sağlayabilir [21] ve Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) [24] stratejileri ile de uyumludur. Çünkü IPCC [24] raporunda, 2100 yılına kadar fosil yakıt kullanımının kademeli olarak azaltılması hatta 2100 yılına kadar aşamalı olarak sonlandırılması tavsiye edildi.

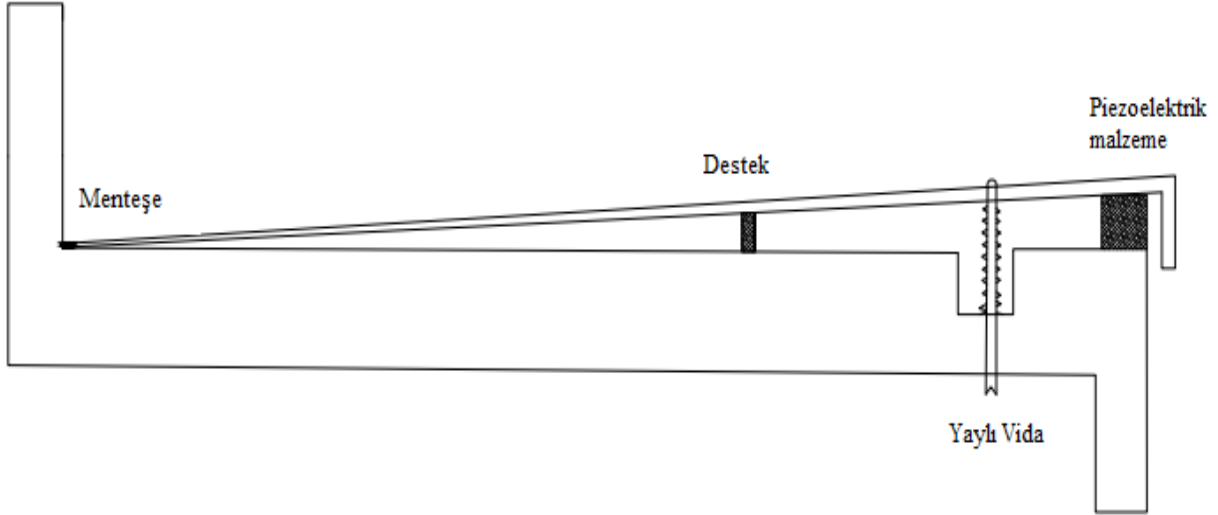
Yürüyen merdivenler günümüzde metro, AVM, tren garı, havaalanları gibi pek çok yerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tırmanma açısı, yükseklik, basamak genişliği gibi etkenler boyutlarını belirler. Çalışma prensibi konveyörleri andırır. Yürüyen merdivenlerdeki hareket mekanizmasını; alt kısmında bulunan dönüş istasyonu ve üst kısmında yer alan hareket istasyonu ve bu iki istasyonu birbirine bağlayan raylar oluşturur. Tekerlekli zincirlerle basamakların birbiriyle bağlantısı ve tahriki sağlanır [25]. Piezoelektrik malzemelerin kullanım alanlarının geçmişten bugüne gelişen teknoloji ile artması sonucu gündelik hayatta sıklıkla kullanılan yürüyen merdivenlere ilave edilecek hareketli basamakta kullanılan PEHDs ile enerji hasadı mümkün olabilir mi? sorusu çalışmanın ana amacını oluşturdu. PEHDs'li basamağın sıfır GHG emisyonlu enerji üretim sistemleri olma potansiyeli bulunmaktadır. Metro, alışveriş merkezleri, hastane vb alanlarda yoğun insan trafiği ve beraberinde önemli miktarda mekanik enerji vardır ve bu PEHDs'li basamakların kullanımıyla rüzgâr veya güneş çiftlikleri ölçeğinde önemli bir potansiyel elektrik kaynağı olabilir. Özellikle insanların günlük yaşamında sıklıkla

kullandığı metro istasyonları, yüksek enerji tüketimi ve kullanım yoğunluğuna sahiptir. Bir metro hattı ayda yaklaşık 12.5 milyon kW tüketmektedir [26]. Bu alanlarda kullanılması enerji tüketimi ve emisyonların azaltımına katkı sağlayabilir. En önemlisi de karbonsuz bir gelecek için yenilenebilir enerji hasadı teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlayabilir [16, 27]. Ayrıca, karar vericileri, enerji hasadı yapan PEHDs'li basamağı yeni projelerde kullanmaya teşvik edecektir. Çünkü tasarlanan piezoelektrik malzemeli enerji hasadı yapan basamak ile yüksek popülasyon yoğunluklu alanlarda insan hareketliliğinden kaynaklanan atık enerji toplanarak, kesintisiz enerji üretimi ve enerji gereksinimlerinin karşılanması mümkündür. Bu açıdan araştırma da iç ortamlarda sürdürülebilir temiz enerji üretimi ile GHG emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma da tasarlanan (Şekil 1) hareketli PEHDs basamak ile yürüyen merdivenler için enerji ihtiyacının bizzat kullanıcılardan enerji hasadı yapılarak karşılanması amaçlanmıştır. Enerji hasadı yürüyen merdivenleri yukarı ve aşağı yönlerde kullanan kullanıcıların hareketli basamaktaki günlük hareketleri ile gerçekleşecektir. Tasarlanan bu basamak, iç ortamlardaki farklı kullanım alanlarında fabrikalarda-konveyörlerde kullanılabilir formdadır.

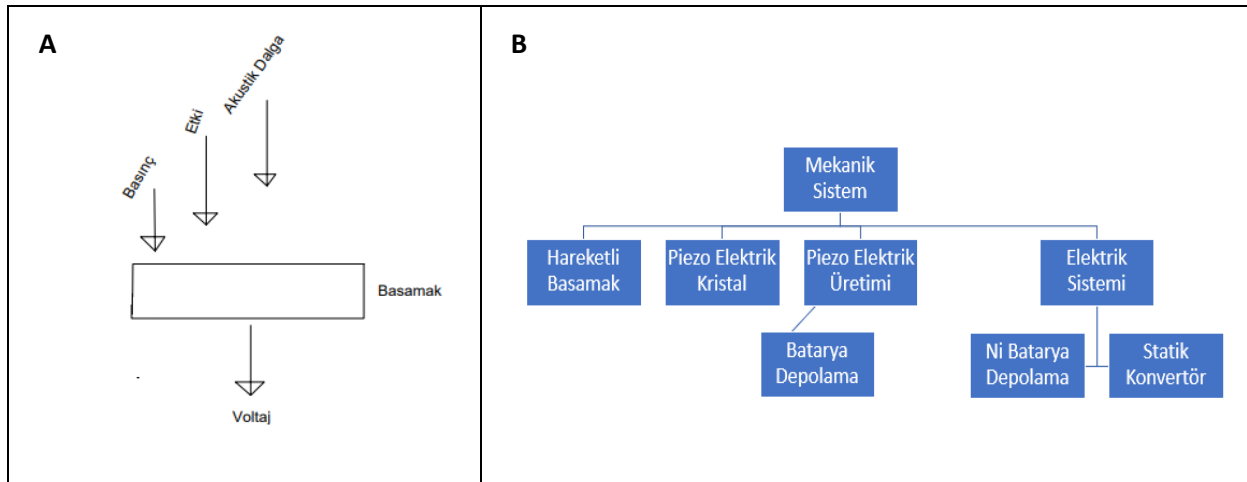
Yürüyen merdivenlerin başlangıcı ve bitişi üzerine basıldığında basınç ve beraberinde akustik titreşimler (dalgalar) oluşacaktır. Bu titreşimler mekanik enerjinin vektörleridir, piezoelektrik malzemeler ile mekanik enerji geri kazanılacak ve elektrik enerjisine dönüştüreceklerdir. Çalışma da geleneksel basamak modifiye edilerek geleneksel basamak güvenilirliğinde (herhangi kaza riskine karşı) hareketli basamak kullanılarak mekanik enerjinin, piezo-dönüştürücüler ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Üretilen elektrik enerjisi LTC3588 Energy Harvester Modüle sahip piezo jeneratörlerde depolanarak kullanım alanlarında gereksinim duyulan elektrik ihtiyacına (motor, aydınlatma vb.) katkı sağlaması planlanmaktadır. Merdiven basamağına piezoelektrik malzemenin yerleştirilmesi düşük işçilik maliyeti ile sağlanabilir. Ancak kullanılacak piezoelektrik malzemeyi belirlemek oldukça zordur. Elektriksel empedans yani piezoelektrik malzemenin direnci önemli ölçüde kullanılan piezoelektrik malzemeye bağlıdır. Yapılan çalışmalar ilave ağırlık ya da mekanik ön gerilmenin elektriksel empedans üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gösterdi [28]. Tasarlanan sistemden en fazla miktarda enerji hasadı elde etmek için seçilecek piezoelektrik malzemenin özellikleri oldukça önemlidir [29]. Çalışma da piezoelektrik malzeme olarak ticari satılan hammaddesi PZT (kurşun zirkonat titanat) olan dielektrik sabiti yüksek APC 855 için hesaplamalar yapıldı. PZT gibi kurşun içeren malzemeler yüksek elektromekanik ve ferroelektrik özelliklerine sahiptir [30]. Yoon (2008) [31] bu piezo malzemenin metrekarede 10197.162 ton mekanik basınca dayanıklı olduğunu askeri uygulamalarda dahi kullanılabileceğini raporladı. Bu özelliklerinden dolayı APC 855 seçildi. Çalışma da enerji hasadının gerçekleştirileceği Şekil 1'de sunulan hareketli PEHDs basamak tasarlandı. Bu basamak sadece kapalı alanlarda kullanıma uygundur (piezoelektrik malzemenin çalışma sıcaklığının Curie sıcaklığının altında olması için).



Şekil 1. Çalışma da tasarlanan enerji hasadının gerçekleştirileceği hareketli PEHDs basamak

Çalışma da yürüyen merdivenlerin başlangıç ve bitişinde konumlandırılacak hareketli bir PEHDs basamağı insan hareketinden enerji üretmek amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Basamağın üst plakası birkaç yay kullanılarak desteklenmiştir. Bu yaylar, basamağa uygulanan basınç sonrasında plakanın orijinal başlangıç konumuna geri dönmesini sağlayacaktır. Ayrıca yaylar sayesinde basamağın üst plakasının esnekliği de sağlanacaktır. Bu, sistemin tekrar kullanılabilirliğini artırır. Bu tasarım, sürekli ve verimli bir enerji üretimi için kritik bir öneme sahiptir. Basamağın üzerine yerleştirilen piezoelektrik malzemeler (PDHs), insanların basamağa bastığında oluşan dikey basıncı algılayacak ve bu piezoelektrik malzeme üzerinde yatay bir basınç (stres) oluşturacak, onu deforme edecek ve sonuç olarak elektrik üretecektir. Dikey basınç, beraberinde oluşan etki ve akustik dalgalar ile Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşecektir. Bu dönüşüm süreci, Şekil 2 (a)'da gösterildiği gibi, basamağın yapısı ve piezoelektrik malzemenin özellikleri sayesinde gerçekleşir.

Şekil 2 (b)'de çalışma da tasarlanan sistemin çalışma prensibi sunulmuştur.



Şekil 2. (A) Hareketli PEHDs basamakta elektrik enerjisi hasadı ve (B) hasadın gerçekleştirileceği sistem üniteleri

Merdivenin sırt plakası üst plakadan bağımsız arka kısma menteşelenecektir. Ayarlanabilir kelebek somun vida ile merdivenin hem dikey hareketi sınırlandırılacak hem de merdivenin dikey hareketinin ayarı sağlanacaktır. Basamak ile taban arasındaki boşluğa yerleştirilen piezo malzeme basamağın üzerine basılması ile oluşan titreşimleri (mekanik enerjiyi) elektrik enerjisine dönüştürecektir. Piezoelektrik malzemeyi sadece elektrik enerjisi üretici olarak değil üretilen enerjiyi depolamak içinde kullanmak mümkündür [32]. Piezo malzemedan mekanik etki ile üretilen AC sinyali AC-DC doğrultucu kullanılarak akımın DC'ye çevrilmesi ve LTC3588 Energy Harvester Modüle sahip tek katmanlı bir piezo jeneratör ile üretilen elektrik enerjisinin depolanması amaçlanmıştır.

Sonuçlar ve Tartışma

Ticari yürüyen merdivenlerin çalışabilmesi için gerekli motor gücü aşağıdaki denklemlerle hesaplanmış ve piezo malzeme olarak PZT içeren ticari piezoseramik APC 855 kullanılması ile ortalama 75 kg'lık bir bireyin bu gücün ne kadarını karşılayabileceği hesaplanmıştır. APC 855; darbelere dirençli ve ticari ürün oluşu, kolaylıkla temin edilebilmesi vb. avantajları yüzünden seçilmiştir. Çalışmada genellikle alışveriş merkezlerinde en basit yürüyen merdivenlerin 6 m uzunluğunda en küçük basamak genişliğinin 60 cm olduğu, 30° açıyla tırmandığı kabul edilerek [33] denklem 1 kullanılarak basamak sayısı, denklem 2 kullanılarak gerekli kuvvet, denklem 3 kullanılarak gerekli tahrik gücü hesaplandı.

$$B = \frac{H}{h} \times 2 \dots \dots \dots (1)$$

Denklem 1'de B: Basamak sayısını, H: Yürüyen merdivenin uzunluğunu, h: Basamak derinliğini ifade etmektedir.

$B = (6/0.6) \times 2 = 20$ basamak 20 basamağın tahriki için gerekli kuvvet aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı.

$$B = M \times B \times \Phi \times A \dots \dots \dots (2)$$

Burada P: Kuvvet, M: Ağırlık, B: Basamak sayısı, Φ : Doluluk faktörü, A: basamaktaki kullanıcı sayısını ifade etmektedir. $\Phi=0.75$, M=ortalama yolcu ağırlığı 75 kg, A: 15 kabul edildi.

$$P = 75 \times 20 \times 0.75 \times 1 = 1125 \text{ daN.}$$

20 basamağın tahriki için gerekli güç (N), denklem 3 kullanılarak hesaplandı.

$$N = v \times P \times \sin \alpha / 102 \times \eta \dots \dots \dots (3)$$

Burada v: yürüyen merdivenin hızını, $\sin \alpha$: yürüyen merdivenin tırmanma açısını, η : sistem verimini, P: kuvveti ifade eder. η : 0.75, α : 30, v: 0.5 kabul edilmiş,

$$N = (0,5 \times 1125 \times \sin 30) / (102 \times 0,75) = 3.33 \text{ kW olarak hesaplandı.}$$

Piezoelektrik malzemedan üretilen açık devre elektrik gerilimi (U) denklem 4 ile hesaplandı.

$$U = dxF/C \dots \dots \dots (4)$$

Burada d: piezoelektrik malzemenin dielektrik sabiti, F:kuvvet, C: piezoelektrik malzemenin kapasitansdır. Çalışma da ticari satılan hammaddesi PZT olan APC 855'in biyomorfik özellikleri $\tan \delta:0.02$, $K_{33}^T:3300$ 'dür. $E_o: 8,854187817.10^{-12}$, dış çap:27 mm (Piyasadaki piezo disk dış çapı esas alınarak kabul edildi), kalınlık: 1 mm kabul edilerek kapasitans denklem 5 kullanılarak 16.7215 nF olarak hesaplandı.

$$C_s = K_{33}^T \cdot E_o \cdot A / h \dots \dots \dots (5)$$

Burada C_s : kapasitans, K_{33}^T : elektrik alan faktörü, E_o : dielektrik sabiti, A:alan, h:kalınlık değeridir.

75 kg ağırlıktaki bir kullanıcının birim yüzeye oluşturacağı kuvvet $9.806 \times 75 = 735.45$ Newton olarak belirlenmiş buna göre dielektrik sabiti 630 pC/N olan ticari toz haldeki APC 855 (APC International Ltd, 1 kg) piyasadaki hazır disklerin boyutunda (Çap: 27 mm, kalınlık:1 mm) laboratuvar ortamında hazırlandığında denklem 4 kullanılarak 1 piezo diskin açık devre elektrik gerilimi

$U = 630.10^{-12} \times 735.45 / 16.7215.10^{-9} = 27.63$ V'dur. 20 basamağın tahriki için gerekli kuvvet 3300 Volt olarak belirlenmişti, buna göre laboratuvar ortamında hazırlanan disklerden $3300 / 27.63$ yaklaşık 120 disk bu gereksinimi karşılamaktadır. 60 cm uzunluğundaki bir basamağa, 2.7 cm çapındaki piezoelektrik disklerden 22 adet yerleştirilmiştir. Bu diskler, 3 sıra halinde düzenlenerek bir basamakta toplam 66 disk kullanılmıştır. Bu yerleşim, basamağın yüzey alanını maksimum düzeyde kullanarak enerji üretimini optimize etmektedir. Disklerin çapı ve aralarındaki mesafe, mekanik basıncın eşit dağılımını sağlayarak her diskin verimli çalışmasını garanti altına alır. Bu durumda, tek bir basamakta üretilen toplam elektrik gerilimi $U_{\text{toplam}} = 66 \cdot 27.63 \text{ V} = 1823.58$ V'dur. İki adet PEHDs basamağı ile üretilen toplam gerilim ise $U_{\text{toplam}} = 2 \cdot 1823.58 \text{ V} = 3647.16$ V dur. Bu, yürüyen merdivenin 3300 V'luk elektrik ihtiyacını karşılamak için yeterlidir ve %10'luk bir güvenlik marjı sağlamaktadır.

Tokyo'nun Shibuya tren istasyonu, piezoelektrik teknolojisinin yenilikçi bir uygulama örneği olarak öne çıkmaktadır. İstasyonun zemin karoları, PEHDs ile donatılmıştır. Tek bir adımda bir kişinin ürettiği güç yaklaşık 0.1 W'dır. Bu enerji, istasyonun enerji gereksiniminde kullanılmaktadır. LED ekran, günlük üretilen toplam enerji miktarını gerçek zamanlı olarak güncellemektedir [34]. Bu çalışma da tasarlanan basamağın bir kişinin adım atması ile en kötü şartlar da (0.01 Amper akım geçtiği kabul edildiğinde) 0.2763 W güç üreteceği düşünülmektedir. Bu tahmini sonuç, Japonya örneği üzerinden elde edilen ampirik verilerle karşılaştırıldığında, gerçek sonuçlara oldukça yakındır. Shibuya istasyonunu her gün yaklaşık 2.4 milyon kişi kullanmaktadır. Bu yoğun trafik, sistemin ölçeklenebilirliğini ve toplam enerji üretimini önemli ölçüde artırır. Bu durum, piezoelektrik sistemlerin düşük güçte enerji hasadı için geleneksel kullanım alanlarının ötesinde, daha büyük ölçekli uygulamalara uyarlanabileceğini göstermektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Elektrik enerjisi günlük yaşantıda vazgeçilemeyen dünyada en yaygın olarak kullanılan enerji türüdür. Tamamen kullanımından vazgeçilemeyen bu enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması fosil yakıt kullanımının da azaltılması anlamına gelmektedir. Ülkemizde ve yurtdışında birçok araştırmacı laboratuvar ortamında piezo özellik gösteren nanofiber materyal geliştirmiştir [2,35,36]. Ülkemizde gerçekleştirilen bu çalışma da geliştirilen nano fiberin piezo özelliğe sahip olmasından dolayı APC 855'e alternatif olarak kullanılması mümkündür. Doğu Karadeniz bölgesinde rezervi bulunan [29] turmalin gurubu minerallerin dielektrik sabiti Tablo 1'de görüldüğü gibi kuvarsdan daha yüksektir. Turmalinin laboratuvar ortamında geliştirilen modifikasyonlarının da bu amaçla kullanılması mümkündür [10].

Kurulum maliyetleri kıyaslandığında klasik sistem yürüyen merdiven motorunun (12 kW) en düşük mekanik kurulum maliyeti 8000 \$ iken laboratuvarında değil piezodiskler hazır temin edildiğinde dahi yaklaşık maliyeti 8000 \$'dan daha düşüktür [37]. Piezodisklerin laboratuvar ortamında üretilmesi durumunda maliyetler çok daha az olacaktır. Ayrıca klasik sistem yürüyen merdiven motoru (günde 10 saat çalıştığı kabul edildiğinde) günde yaklaşık 50 kWh/gün yılda 18250 kWh/gün enerji tüketirken, piezo sistemin herhangi bir işletme maliyeti olmayacaktır. Tasarlanan hareketli basamağın kapalı mekânlarda yürüyen merdivenler dâhil birçok alanda kullanılarak GHGs özellikle de CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilerek mevcut elektrik üretimini artırmada da kullanılması mümkündür. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinin az olduğu zamanlarda, piezoelektrik sistemler ek enerji sağlayabilir. GES ve RES'lerdeki mekanik titreşimler (örneğin, rüzgâr türbinlerinin hareketi veya güneş panellerinin rüzgarla titreşimi) gibi atık enerjiyi elektrığe dönüştürerek enerji verimliliğini artırır.

Yazarların Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Sharafi, A., Chen, C., Sun, J.-Q., Fortier, M.-O., 2024. Carbon footprint of piezoelectrics from multi-layer PZT stacks to piezoelectric energy harvesting systems in roads. *Science*, 27(10): p. 110786.
- [2] Zhang, H., Jiang, S., Duan, G., Li, J., Liu, K., Zhou, C., Hou, H., 2014. Heat-resistant polybenzoxazole nanofibers made by electrospinning. *European polymer journal*, 50: p. 61-68.
- [3] Andriopoulou, S.A., 2012. review on energy harvesting from roads.
- [4] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>, erişim tarihi:31.10.2025
- [5] https://iea.blob.core.windows.net/assets/beceb956-0dcf-4d73-89fe-1310e3046d68/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf erişim tarihi:31.10.2025
- [6] Outlook IE. International Energy Outlook 2023 with projections to 2050. 2023, Available from: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2023_Release_Presentation.pdf.
- [7] <https://dosya.kmu.edu.tr/sbe/userfiles/file/tezler/iktisat/sibelkeskink%C4%B1%C4%B1c.pdf>, erişim tarihi:31.10.2025.
- [8] Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F., 2014. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: p. 748-764.
- [9] Aslan, E., Bilgin, M.Z., Erfidan, T., 2016. Piezoseramik Malzemelerle Elektrik Enerjisi Üretilmesi ve Depolanması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2).
- [10] Kumar, P., 2013. Piezo-smart roads. *International Journal of Enhanced Research in Science*

- Technology and Engineering. *Electronics Engineering*, 2(6): p. 65-70.
- [11] Inc MM, 1997. Guide to modern piezoelectric ceramics, review. Bedford, Morgan Matroc Inc. 7-9
- [12] Chua, Y.S., Kim, Y., Li, M., Aventian, G.D. Satyanaga, A., 2024. A Survey of Advanced Materials and Technologies for Energy Harvesting from Roadways. *Electronics*. 13: DOI: 10.3390/electronics13244946.
- [13] <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1828745>, erişim tarihi:31.10.2025.
- [14] Heywang, W., Lubitz, K. Wersing, W., 2008. Piezoelectricity: evolution and future of a technology. Vol. 114. Springer Science & Business Media.
- [15] Tressler, J.F., Alkoy, S. Newnham, R.E., 1998. Piezoelectric sensors and sensor materials. *Journal of electroceramics*, 2: p. 257-272.
- [16] Moussa, R.R., 2019. The effect of piezo-bumps on energy generation and reduction of the global carbon emissions.
- [17] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/piezoelectric-effect> (chapter) erişim tarihi:31.10.2025.
- [18] Granstrom, J., Feenstra, J., Sodano, H.A. Farinholt, K., 2007. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart materials and structures*, 16(5): p. 1810.
- [19] Dagdeviren, C., Li, Z. Wang, Z.L., 2017. Energy Harvesting from the Animal/Human Body for Self-Powered Electronics. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 19(Volume 19, 2017): p. 85-108.
- [20] Anton, S.R. Sodano, H.A., 2007. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures*, 16(3): p. R1.
- [21] Walubita, L.F., Sohoulane Djebou, D.C., Faruk, A.N., Lee, S.I., Dessouky, S. Hu, X., 2018. Prospective of societal and environmental benefits of piezoelectric technology in road energy harvesting. *Sustainability*, 10(2): p. 383.
- [22] Woodcock, J., Edwards, P., Tonne, C., Armstrong, B.G., Ashiru, O., Banister, D., Beevers, S., Chalabi, Z., Chowdhury, Z., Cohen, A., Franco, O.H., Haines, A., Hickman, R., Lindsay, G., Mittal, I., Mohan, D., Tiwari, G., Woodward, A. Roberts, I., 2009. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: urban land transport. *The Lancet*, 374(9705): p. 1930-1943
- [23] EPA. Energy and the Environment, 2015, United States Environmental Protection Agency.
- [24] IPCC. Mitigation of climate change, in Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 2014. p. 147.
- [25] İmrak, C.E., Gerdemeli, İ., Asansörler ve Yürüyen Merdivenler. 2000: İstanbul Birsen Yayınevi.
- [26] Elkadeem, M.R., Wang, S., Azmy, A.M., Atiya, E.G., Ullah, Z. Sharshir, S.W., 2020. A systematic decision-making approach for planning and assessment of hybrid renewable energy-based microgrid with techno-economic optimization: A case study on an urban community in Egypt. *Sustainable Cities and Society*, 54: p. 102013.
- [27] Moussa, R.R., Mahmoud, A.H. Hatem, T.M., 2020. A digital tool for integrating renewable energy devices within landscape elements: Energy-scape online application. *Journal of Cleaner Production*, 254: p. 119932.
- [28] Türker, Ö., 2009. Pzt/polimer esaslı aktif titreşim kontrolüne uygun akıllı giriş tasarımı ve imalatı.
- [29] Heywang, W., Lubitz, K. Wersing, W., 2008. Piezoelectricity: evolution and future of a technology. Vol. 114. Springer Science & Business Media.
- [30] Kaya, M.M., Özyazıcı, E., et al. 2019. Kurşun Nikel Niyobat-Kurşun Zirkonat Titanat seramik kompozisyonun elektriksel ve elektromekanik özellikleri ve dönüştürücü uygulaması. *AKÜ FEMÜBİD*, 19: p. 294-301.

- [31] Yoon, S.-H., Lee, Y.-H., Lee, S.-W., Lee, C., 2008. Energy-harvesting characteristics of PZT-5A under gunfire shock. *Materials Letters*, 62(21-22): p. 3632-3635.
- [32] Arnau, A., Soares, D. 2009. Fundamentals of piezoelectricity, in *Piezoelectric transducers and applications*. 2009., Springer. p. 1-38.
- [33] DIN E. 115-1: 2017: Safety of Escalators and Moving Walks—Part 1: Construction and Installation. German Institute for Standardisation (DIN), 2017.
- [34] Project Report-Piezoelectric Tiles Is a Sustainable Approach for Designing Interior Spaces and Creating Self- Piezoelectric Tiles Is a Sustainable Approach for Designing Interior Spaces and Creating Self-Sustain Projects . 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/397/1/012020>.
- [35] Oflaz, K., Oflaz, Z., Ozaytekin, I., Dincer, K., Barstugan, R., 2021. Time and volume-ratio effect on reusable polybenzoxazole nanofiber oil sorption capacity investigated via machine learning. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(30): p. 50732.
- [36] Varposhti, A., Yousefzadeh, M., Kowsari, E., Latifi, M., 2020. Enhancement of β -phase crystalline structure and piezoelectric properties of flexible PVDF/ionic liquid surfactant composite nanofibers for potential application in sensing and self-powering. *Macromolecular Materials and Engineering*, 305(3): p. 1900796.
- [37] https://tr.made-in-china.com/co_asiafuji/product_Factory-Directly-Shopping-Mall-Elevator-Escalator-Cost_uohoreorry.html, erişim tarihi: 31.10.2025.