



## Metro İstasyonlarında Piezoelektrik Malzeme Kullanarak Elektrik Enerjisi Üretilmesi

Akın ÇALIŞIR<sup>1\*</sup>, Dr. Mehmet Taciddin AKÇAY<sup>2</sup>, Barış SÜRMEİ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Elektromekanik Grup, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Elektromekanik Grup, Ankara, Türkiye

Istanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (2020) 2 (1): 1-6  
DOI: xxxxxx/xxxxxx

YAYIN BİLGİSİ
Yayın geçmişi:
Gönderilen tarih: 07 Kasım 2019
Kabul tarihi: 27 Ocak 2020
Yayınlanma tarihi 19 Şubat 2020
<b>Anahtar kelimeler:</b>
Yenilenebilir,
Enerji,
Piezoelektrik,
Metro,
İstasyon
Renewable,
Energy,
Piezoelectric,
Metro,
Station

### ÖZET

Günümüzde enerji kaynakları günlük yaşam, ulaşım ve endüstri için çok önemlidir. Enerji özellikle ulaşım yatırımları için kritik değere sahiptir. Dünyada enerji kaynakları sınırlı olup mevcut rezervler her geçen gün azalmaktadır. Bu azalmadan ötürü yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı daha çok tercih edilmektedir. Özellikle gelişen teknoloji ile birlikte yeni yenilenebilir enerji üretim sistemleri tasarlanmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri arasında bulunan piezoelektrik enerji günümüzde güncelliğini korumaktadır. Piezoelektrik ile hareket enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Metro sistemlerinde araçtan iniş ve istasyondan çıkış ile istasyondan iniş ve araca binış güzergahı boyunca yoğun yolcu hareketi olduğu için ciddi bir hareket enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada Sabiha Gökçen Havalimanı ile Kurtköy arasında yapılacak olan metro hattında bulunan Teknopark İstasyonunda Piezoelektrik malzemeden elektrik üretimi araştırılmıştır. Çalışmada üretilen enerjinin miktarı ve hangi sistemlere aktarılacağı anlatılmıştır.

### ABSTRACT

Today, energy resources are very important for everyday life, transportation and industry. Energy is especially critical for transport investments. Energy resources in the world are limited and the existing reserves are decreasing day by day. Due to this decrease, the use of renewable energy sources is more preferred. Especially with the developing technology, new renewable energy production systems are designed. Piezoelectric energy, which is one of the renewable energy systems, is up to date. Motion energy is converted into electrical energy with piezoelectric. In and out of the vehicle in the subway system and exit from the station with the station landing and boarding route there is considerable movement energy potential as there is intense passenger movement throughout. In this study, electricity production from Piezoelectric material was investigated at Teknopark Station located on the metro line between Sabiha Gökçen Airport and Kurtköy. In this study, the amount of energy produced and the systems to be transferred are explained.

### 1. Giriş

“Piezo” kelimesi Yunancada basınç anlamına gelmektedir. Piezoelektrik olayı 18.YY Fransız fizikçiler Jacques ve Pierre Curie tarafından keşfedilmiştir. (Novotny ve Ronkanen, 2016). Piezoelektrik özellik, mekanik bir enerjiyi elektriğe ya da tam tersi olan elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirebilmektedir. Piezoelektrik özelliği, (özellikle kristaller ve belirli kristaller; kemik gibi) bazı malzemelere uygulanan mekanik basınç sonucunda, malzemenin elektrik alan ya da elektrik potansiyel değiştirme yeteneğidir.(Gautschi, 2002). Piezoelektrik malzemeler içinde genellikle kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) seramik kullanılır. Bu etkiyi yaratmak için simetri olmayan kristaller

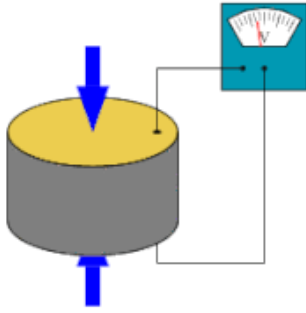
kullanılır. Çinko Oksit (ZnO), Turmalin, Kuartz (SiO<sub>2</sub>), PVDF (Poli-vinilidin-klorür) ve Baryum Titanat (BaTiO<sub>3</sub>) kullanılan malzemelerden bazılarıdır. Şekil 1’de Piezoelektriğin çalışma prensibi görülmektedir. (Anonymus, 2018).

Yeraltı raylı sistem ulaşımı diğer ulaşım sistemlerine göre; yatırım maliyeti, projelendirme ve uygulama sürecinin uzun sürmesinin yanı sıra hazırlık aşamasında detaylı çalışmaları gerektiren bir ulaşım sistemidir. Bu açıdan Fizibilite Etüdü, Cer Gücü (raylı sistemlerdeki araçların DC güç ihtiyacını karşılayan redresörlerin ürettiği güç) Simülasyon Raporu ve İşletme Simülasyonu gibi birbiriyle ilişkili çalışmalar önem arz etmektedir. Bu çalışmada Fizibilite Etüdüde öngörülen yolculuk verileri, işletme sıklığı ve gerekli araç sayısı verileri

\*Sorumlu yazar.

E-mail adresi: [akin.calisir92@gmail.com](mailto:akin.calisir92@gmail.com) (Akın Çalışır)

bu rapor kapsamında da referans olarak kullanılmıştır. Ayrıca mevcut hattaki sinyalizasyon sistemi verileri de hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 1: Piezoelektrik Çalışma Prensibi

Yeraltı raylı sistem çalışmalarında kabul görmüş bir simülasyon aracı olan SES(Subway Enviroment Simulation) programıyla tanımlanan güzergah ve araç bilgileri ile işletim senaryosu verileri elde edilmiştir. İşletme Teknopark, Yenişehir ve Kurtköy istasyonlarını kapsamaktadır. Tablo 1’de hat verileri verilmektedir.

Tablo 1: Hat verileri.

Hat istasyon sayısı	3 istasyon
Hat uzunluğu	5000 m
Maksimum eğim	%3,7
Makas Yapısı	2 adet
İstasyon Duruş Süresi	20 saniye

Referans araç verileri ise Tablo 2’de gösterilmektedir. Araç verileri cer simülasyonu, sinyalizasyon sisteminin modellenmesi, havalandırma unsurları gibi bir çok alt disiplini ilgilendirmektedir.

Tablo 2: Araç Verisi

Parametre	Değer
Maksimum Hız (km/h)	80
Maksimum İvmelenme (m/s <sup>2</sup> )	1,1
Maksimum Frenleme (m/s <sup>2</sup> )	1,1
Uzunluk (m)	22,4
Ön Yüz Alanı (m <sup>2</sup> )	10,8

DC beslemeli raylı sistemlerde kullanılan araçların tükettiği elektrik enerjisi doğru akım olduğu için CER trafosu adı verilen elektrik enerjisini alternatif akımdan doğru akıma çeviren trafolar kullanılmaktadır. CER trafoları yukarıda bulunan tablolarda verilen veriler ile yapılan cer simülasyonu sonucunda birbiri ile yedekli olacak şekilde 2 adet 3300 kVA gücünde cer trafosu uygun görülmüştür. Ayrıca oluşturulan elektrik projelerine göre de birbiri ile yedekli olacak şekilde 2 adet 1600 kVA gücünde iç ihtiyaç trafosu uygun görülmüştür. İstasyonlarda bulunan trafoların güçleri hesaplanırken acil durum olarak nitelendirdiğimiz yangın durumunda çalışacak tüm ekipmanların güçleri baz alınarak hesaplamalar

yapılmaktadır.

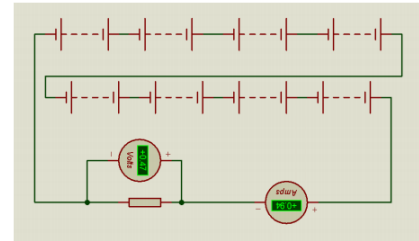
Metro istasyonlarında enerji tüketimlerinin yüksek olması ve enerji maliyetlerinin gün geçtikçe artmasından dolayı metro istasyonlarında da yenilenebilir enerjinin önemi artmaktadır. Ülkemizde bulunan metro istasyonlarında erişim zorluğu ve diğer zorlayıcı etkilerden dolayı yenilenebilir enerji henüz yeterli şekilde kullanılamamaktadır. Yer altında bulunan istasyonlar güneş ve rüzgar gibi enerji üretebildiğimiz kaynakları sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı gelişen teknoloji ile birlikte farklı tasarımlar araştırılmaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Piezoelektrik özelliği, (özellikle kristaller ve belirli kristaller; kemik gibi) bazı malzemelere uygulanan mekanik basınç sonucunda, malzemenin elektrik alan ya da elektrik potansiyel değiştirme yeteneğidir (Gautschi, 2002). Bu etki, malzemenin içindeki polarizasyon yoğunluğundaki değişimle doğrudan alakalıdır (Fujimoto, 2014). Piezoelektrik malzemeler içinde kullanılmakta olan çoğunlukla kurşun-zirkonyum- titanyum (PZT) seramiktir. Piezoelektrik polimerlerden ya da seramiklerden de, aynı doğrultuda uygulanan yük (basma ya da çekme) sırasında malzeme içinde ki kristal yapının her iki tarafında bulunan +q ve -q yüklerin ortaya çıkması sonucu oluşur (Fujimoto, 2013). Piezoelektrik etki yaratmak için en önemli olan simetri merkezi olmayan kristaller kullanılmaktadır. Kullanılan başlıca malzemeler;

- Kuartz (SiO<sub>2</sub>)
- Turmalin
- Baryum Titanat (BaTiO<sub>3</sub>)
- Çinko Oksit (ZnO)
- PVDF (Poli-vinilidin-klorür)

Kullanılan piezoelektrik malzemenin kullanılan diğer piezoelektrik döşemelerden farkı aynı zamanda üzerinde bulunan solar hücreler sayesinde güneş enerjisini de kullanarak üretilen enerjinin gücünü artırmaktadır. Şekil 2’de görüleceği gibi kullanılan tüm döşemeler birbirine seri bağlanarak üretilen güç miktarı artırılmıştır.



Şekil 2. Devre Elemanlarının Seri Bağlanması

Uluslararası çalışmalarda metro istasyonlarında kullanılan piezoelektrik döşemelerin sadece basınçtan dolayı üretim sağladığı düşünüldüğünde yapmış olduğumuz çalışmanın diğer yapılan çalışmalardan farkı ön plana çıkmaktadır. Bir metro istasyonunda istasyon mimarisinden kaynaklı, istasyonun bilet holü (turnikelerin olduğu kat bilet holü olarak adlandırılmaktadır) katı tavanındaki ışıklıklardan dolayı bu ekipmandan daha verimli bir şekilde faydalanılacaktır. Bu malzeme ilk defa bir metro istasyonunda kullanılacaktır.

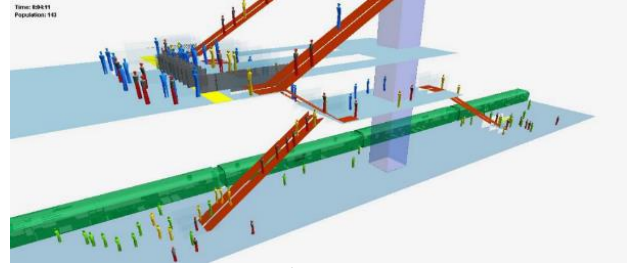
## 3. Bulgular ve Tartışma

Metro istasyonlarında insan sirkülasyonu fazla olduğu için zeminde oluşan basınç fazladır (Bischur, 2012). Benzetim için sistemin yerleşim analizi, yolcu modellemesi ve malzemenin

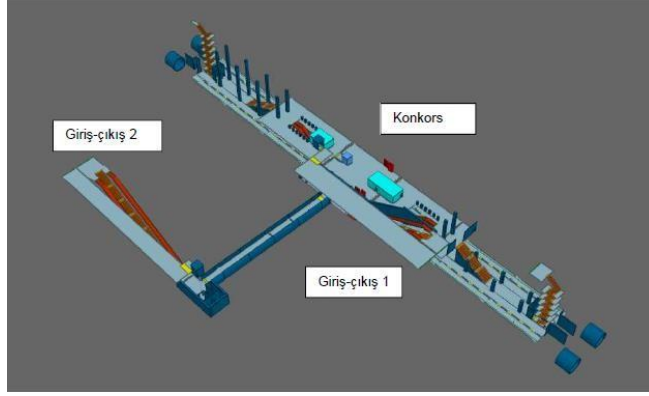
analizi yapılmaktadır.

### 3.1 Sisteme Ait Yerleşim Analizi

Teknopark İstasyonunda yapılan yolculuk simülasyonuna göre yolcu sirkülasyonunun fazla olduğu turnike bölgelerine piezoelektrik döşeme monte edilerek enerji üretilmesi amaçlanmıştır. Teknopark istasyonun genel görünümü Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3: Teknopark İstasyonu Genel Görünüm



MassMotion dizayn sürecinin bilgilendirilmesinde 3 boyutlu görsellik ve analiz sağlamaktadır. Bu yapıda yapılan değişikliklerin yaya davranışlarına etkilerini göstermektedir. Analiz Fruin Hizmet Seviyelerine (Fruin, 1971) göre yoğunluk haritaları, yolculuk verileri ve yayalar tarafından tercih edilen yönler kullanılarak simülasyon içinde sunulabilir.

Analizde kullanılan hizmet seviyesi kriterleri aşağıdaki tabloda açıklanmıştır. İşletmeciler tarafından yapılan önermeler doğrultusunda istasyon elemanları Hizmet Seviyesi C için tasarlanmaktadır. Ancak Transport for London istasyon konkorsu için Hizmet Seviyesi B ve platformlar için Hizmet Seviyesi B/C önermektedir.

Tablo 3: Hizmet Seviyesi Aralıkları

	Normal İşletme	
	Hizmet Seviyesi	
Bilet Holü Açık Alan	B	1.0 m <sup>2</sup> kişi başına
Bilet Holü İçin Kuyruk	C	0.8 m <sup>2</sup> kişi başına
Geçitler- Tek Yön	D	50 yolcu /dk/m genişlik
Geçitler- Çift Yön	C	40 yolcu/dk/m genişlik
Merdivenler Tek Yön	D	35 yolcu/dk/m genişlik
Merdivenler Çift Yön	C	28 yolcu/dk/m genişlik
Yürüyen Merdivenler		100 yolcu /dk
Platforms	B/C	0.93 m <sup>2</sup> kişi başına

Sabiha Gökçen Kurtköy hattı değerlendirildiğinde anlık olarak C seviyesi, genel olarak B ve A seviyeleri kabul edilebilir bir sirkülasyon alanı sağlayabilmektedir. MassMotion kullanılarak yapılan modelleme sonucunda elde edilen performans değerlerinde yukarıda belirtilen Fruin

Hizmet Seviyeleri temel alınmıştır.

Tek konkors çözümüne sahip Teknopark İstasyonu, 8 giriş 8 çıkış olmak üzere toplam 16 adet turnike mevcuttur. Sistem tasarımı için yolcu hareketlerinin davranışı incelenerek en uygun çözüm araştırılmıştır.

### 3.2 Sisteme Girdileri

Dinamik modelleme sırasında yapılan kabuller Tablo 4'te açıklanmıştır.

**Tablo 4:** Kabul verileri

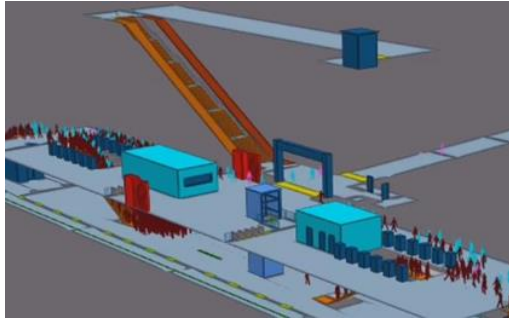
İstasyon Adı	Kurtköy Yönü Hat-1			Sabiha Gökçen H. Yönü Hat-2		
	Binen	İnen	Yolcu	Binen	İnen	Yolcu
Teknopark	47	376	7602	281	98	14988

#### Trenlere Yolcu Dağılımı

Yolcuların trene biniş ve dağılımları yolcuların platforma inerken kullandıkları merdivenlere göre simülasyon içinde hareket eden yayalar için trene en yakın ve en az bekleme süresini sağlayacak davranış tanımlanmıştır. Buna bağlı olarak platforma inen yolcular indikleri merdivene göre kendilerine yakın araçlara dağılmaktadır.

### 3.3 Yolcu Modellemesi

Yolcu hareketlerinin davranışına ait karakteristiğın çıkarılmasına yolcu modellemesi denilmektedir. Bu benzetim ile yolcu yoğunluk haritası çıkarılarak ilgili kısımlar belirlenmektedir. Şekil 3'deki konkors katına ait genel görünüm gösterilmektedir.



**a**



**b**

**Şekil 4:** Teknopark İstasyonu Konkors Katı Yolcu Simülasyonu Sonucu

Teknopark İstasyonu için yapılan simülasyonun yolcu hesabı aşağıda yer almaktadır.

$$Binen\ yolcu(hat - 1) = \frac{Yolcu\ sayısı}{4} *$$

$$1,25(pik\ saat\ faktörü) = \frac{47}{4} * 1,25 = 15,00$$

$$Binen\ yolcu(hat - 1) = (Yolcu\ sayısı)/4 *$$

$$1,25(pik\ saat\ faktörü) = \frac{376}{4} * 1,25 = 118,00$$

$$Binen\ yolcu(hat - 1) = \frac{Yolcu\ sayısı}{4} *$$

$$1,25(pik\ saat\ faktörü) = \frac{7602}{4} * 1,25 = 2376,00$$

$$Binen\ yolcu(hat - 1) = \frac{Yolcu\ sayısı}{4} *$$

$$1,25(pik\ saat\ faktörü) = \frac{281}{4} * 1,25 = 88,00$$

$$Binen\ yolcu(hat - 1) = \frac{Yolcu\ sayısı}{4} *$$

$$1,25(pik\ saat\ faktörü) = \frac{98}{4} * 1,25 = 31,00$$

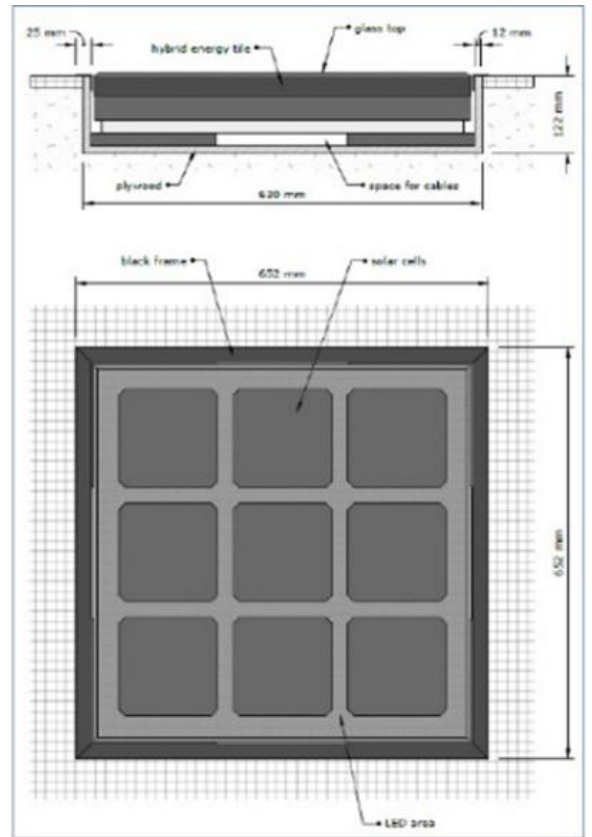
$$Binen\ yolcu(hat - 1) = \frac{Yolcu\ sayısı}{4} *$$

$$1,25(pik\ saat\ faktörü) = \frac{14989}{4} * 1,25 = 4684,00$$

Yukarıda yapılan hesaplamalara göre turnike bölgesinde yolcu sirkülasyonunun fazla olması sebebiyle piezoelektrik döşeme kullanmanın avantajlı olduğu görülmüştür.

### 3.4 Piezoelektrik Malzeme Analizi

Piezoelektrik enerji üretilmesinde kullanılan malzemenin seçimi kritiktir. Döşemenin hareketiyle enerji elde edildiği için bu malzemenin hassasiyeti ve doğruluğu büyük önem arz etmektedir (Gilbert, 2014).



**Şekil 5:** Piezoelektrik Döşeme

Yukarıdaki görselde bulunan piezoelektrik döşeme yolcu sirkülasyonunun fazla olduğu turnike bölgelerinin zeminine monte edilmektedir. Yolcuların döşemede oluşturacakları basınçtan dolayı elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu çalışmada enerjinin daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılması açısından üretilen enerjinin turnikelerin çalışması için kullanılması planlanmıştır. Turnike bölgelerinde kullanmış olduğumuz piezoelektrik döşemede hibrid teknoloji kullanılmıştır. İstasyonun yapısından dolayı güneş enerjisi aldığı da göz önünde bulundurularak solar hücre ve piezoelektrik teknolojisi entegre edilmiştir. Piezoelektrik döşeme üzerinde bulunan solar hücreler sayesinde her bir döşemeden sadece güneş enerjisinden 25 W güç

üretilmektedir. Yolcuların döşeme üzerinde oluşturduğu basınçtan dolayı da yaklaşık 7 W güç üretilmektedir. Üretilen enerji bir adet turnikenin enerji ihtiyacını karşılamaktadır. 0,36 m<sup>2</sup> lik bir alanda yaklaşık 32 W güç üretilmektedir. Şekil 5'teki ile Piezoelektrik sistemine ait bağlantı şeması verilmektedir. Sistem kurulumu için gerekli olan ekipmanlar;

Akıllı kinetik döşeme modülü : 15 adet

Akıllı kontrol fayansı:5 adet

Batarya:1

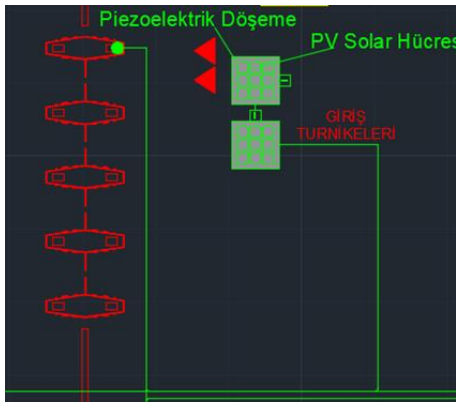
Yerden ısıtma enerjisi(yazılım ve lisans): 1 adet

Eklentiler(yazılım ve lisans): 1 adet

Kablolama ve montaj: 1 adet

Ekran:4 adet

Yukarıdaki ekipmanlar tek bir turnike bölgesine aittir ve kurulum maliyeti 27.650 £'dur. Her turnike bölgesinde turnike olduğu için her bölgenin maliyeti 138.250 £'dur. İstasyonda 4 turnike bölgesi (her turnike bölgesinde 5 turnike bulunmaktadır) olduğu için toplan kurulum maliyeti 553.000 £'dur.  $553.000 * 6,53$  (17.12.2019 Euro Kuru)=3.611.090,00 TL' dir.



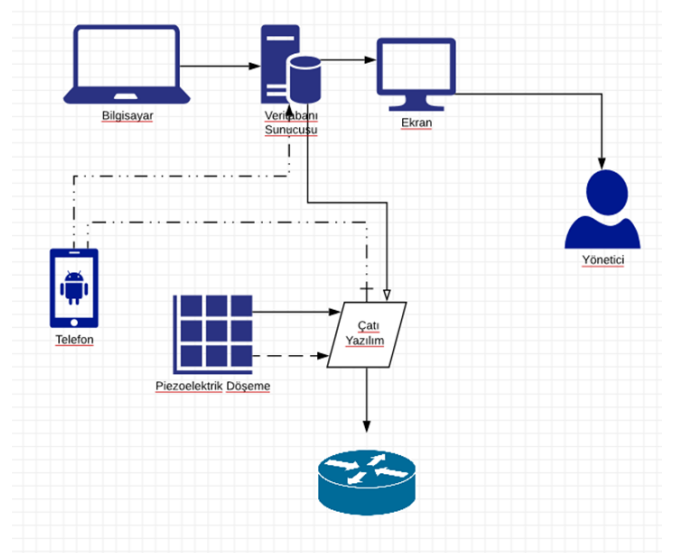
Şekil 6:Piezoelektrik Döşeme Bağlantı Şeması



Şekil 7:Piezoelektrik Döşeme ve Enerji Üretim Görseli

### 3.5 Piezoelektrik Sisteminin Akış Diyagramı

Piezoelektrik sistemi ile elektrik üretilmesine ait diyagram Şekil 8'deki gibi gösterilmektedir. Elde edilen enerji saha bilgisayarı ve operatörler yardımıyla izlenmekte olup bu şekilde sistemin sağlıklı bir şekilde çalışması planlanmaktadır (Chapa, 2013).



Şekil 8:Piezoelektrik Sistem Çalışma Prensibi

Elde edilen enerjinin elde edildiği bölgeye en yakın mahal olan turnike bölgesindeki turnikelerin çalışması için kullanılarak enerjinin etkin ve verimli bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir.

### 4. Sonuç

Bu çalışmada Sabiha Gökçen Havalimanı ile Kurtköy arasında yapılacak olan metro hattında bulunan Teknopark İstasyonunda Piezoelektrik malzemeden elektrik üretimi araştırılmıştır. Çalışmada üretilen enerjinin miktarı ve hangi sistemlere aktarılacağı araştırılmıştır. Çalışmada bir istasyon bölgesinde bulunan turnike bölgesinin yenilenebilir enerji kaynağı ile enerjilendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler göz önünde bulundurularak üretilen enerji miktarı m<sup>2</sup>'de yaklaşık 100 W olmaktadır. Bu da her bir turnikenin enerji ihtiyacını karşılamaktadır. İstasyonda 20 adet turnike olduğu için saatte 2 kW/h enerji tüketmektedir. İstasyon 18 saat işletmede kaldığı için  $18 * 2$  kW/h =36 kW/h enerji tüketimi vardır.

$1 \text{ kW/h} = 0,15 \text{ £}$

$36 \text{ kW/h} * 0,15 \text{ £} = 5,4 \text{ £}$

$5,4 \text{ £} * 365 \text{ gün} = 1971 \text{ £}$

$553.000 \text{ £} / 1971 \text{ £} = 280 \text{ yıl}$

Enerji maliyetlerinin yüksek olduğu günümüzde tamamen yenilenebilir ve temiz bir enerji üretmek ekonomik olarak önemli bir avantaj sağlayacaktır. Bu ürünün yurtdışında üretilmesi ve yatırım maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle günümüzde uygulanma alanı azdır. Fakat Malzeme biliminin ilerlemesi ile üretilen güç değerlerinin artacağı ve ülkemizde de bu ürünün üretilmeye başlanacağı göz önünde bulundurulursa bu ürünü etrafımızda görebileceğiz.

### Kaynaklar

Gautschi, G. Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers.2002, Springer

Haocheng X, Linbing W, Dong W, Cristian D. Piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements, International Journal of Pavement Research and Technology, 2012, 185 Vol:5, No:5 pp.333-337 Aydınöz, D. (2010).

- Davion Hill, Arun Agarwal, Nellie Tong, Assessment Of Piezoelectric Materials For Roadway Energy Harvesting, Energy Research and Development Division Final Project Report, January 2014, Prepared by: DNV KEMA Energy & Sustainability
- HALE, J., 2004. Piezoelectric paint: Thick film sensors for structural monitoring for shocks and vibrations, 7th Biennial ASME Conference on ESDA, July 2004, Manchester UK.
- HE, L., WANG, F., W., MAPPS, D. J., ROBINSON, P., JENKING, D., CLEGG, W. W., 2000. Nanoscale positioning for magnetic recording, *Sensors and Actuators*, 81, 313-316.
- REMBOLD, U., FATIKOW, S., 1997. Autonomus Microrobots, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 19, 375-391.
- SCHNEIDER, J.S., 1991. Ceramic and Glasses, p.1119, *Engineered Materials Handbook V4*, ASM 1991, Ohio, USA.
- Fujimoto, A., Energy Harvesting Flooring. 2014, Stanford University. Mangelsdorf, W.: Metasystems of urban flow: buro happold's collaborations in the generation of new urban ecologies. *Archit. Des.* 83(4), 94–99 (2013)
- Bischur, E. and N. Schwesinger. Energy harvesting from floor using organic piezoelectric modules. In *Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2012 IEEE*. 2012. IEEE.
- Gilbert, J.M., Balouchi, F.: A vibrating cantilever footfall energy harvesting device. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 25(14), 1738–1745 (2014)
- Vanz, E. and J. Karakiewicz, Pedestrian as Generator: Implementing a Stand-Alone Piezo Power Generating Device in the Urban Context, in *Computer-Aided Architectural Design Futures. The Next City-New Technologies and the Future of the Built Environment*. 2015, Springer. p.154-171.
- Lin, G., et al., Harnessing power through electromagnetic induction utilizing printed coils. 2012, Google Patents.
- Rome, L.C., et al., Generating electricity while walking with loads. *Science*, 2005. 309(5741): p. 210 1725-1728.
- Chapa, J.: Energy generating floors to power tokyo subways. *Inhabitat* (2013).
- MAEDA, R., TSAUR, J.J, LEE, S.H., ICHIKIM, 2004. Piezoelectric microatuator device, *Journal of Electroceramics*, 12, 89-100.
- Novotny M. And Ronkanen P. Piezoelectric Actuators (2016).