

# TEKNOFEST HAVACILIK, UZAY VE TEKNOLOJİ FESTİVALİ

## ÇEVRE VE ENERJİ TEKNOLOJİLERİ YARIŞMASI PROJE DETAY RAPORU

**TAKIM ADI: Fonksiyonel Malzemeler Araştırma Grubu (FMAG)**

**PROJE ADI: Triboelektrik Nanojeneratör**

**BAŞVURU ID: 401128**

**TEKNOFEST**  
HAVACILIK, UZAY VE TEKNOLOJİ FESTİVALİ

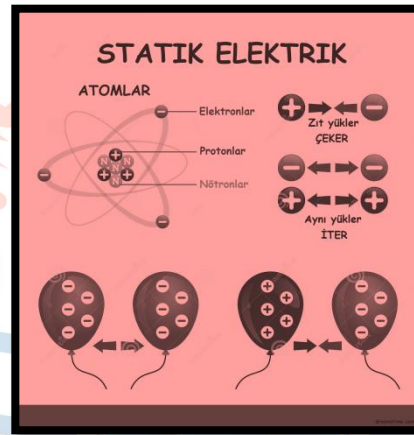
## İÇİNDEKİLER

|  |    |
|--|----|
| 1. Proje Özeti.....                                | 3  |
| 2. Problem/Sorun: .....                            | 6  |
| 3. Çözüm.....                                      | 7  |
| 4. Yöntem .....                                    | 7  |
| 4.1 İnce film üretimi .....                        | 7  |
| 4.2 İnce film karakterizasyonu.....                | 7  |
| 4.3 TENJ'in üretimi.....                           | 8  |
| 5. Yenilikçi (İnovatif) Yönü .....                 | 9  |
| 6. Uygulanabilirlik.....                           | 10 |
| 7. Tahmini Maliyet ve Proje Zaman Planlaması ..... | 10 |
| 8. Proje Fikrinin Hedef Kitle (Kullanıcılar).....  | 11 |
| 9. Riskler .....                                   | 11 |
| 10. Kaynakça.....                                  | 12 |



## 1. Proje Özeti

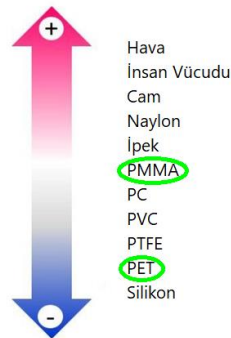
Doğada, yağmur, rüzgar vb. gibi kendiliğinden var olan veya insan hareketliliği gibi yapay etkiler sonucu ortaya çıkan mekanik etkiler kullanılarak, yenilikçi ve kullanışlı enerji hasat sistemleri oluşturma arayışı, bir süredir araştırmacıları meşgul etmektedir. Triboelektrik etki (TEE) prensibine dayalı atık enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülebileceği, göreceli olarak kolay ve ucuz sistemlerin geliştirilmesi de bu arayışın başında gelmektedir [1]. Bu yöntem, ucuz, basit ve etkin yaklaşım çerçevesinde sürtünme ile yüklenme süreci kullanılarak mekanik enerjinin elektriksel güce dönüştürülmesi sonucu küçük elektronik cihazların çalıştırılabilmesine olanak sağlamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Triboelektrik etki [2]

İki yüzey arasında sürtünmeyle oluşan mekanik deformasyon sonucunda, nano boyuttaki yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak iki yüzeyde eşit fakat zıt işaretli yükler üretilmektedir. Zıt işaretli bu yükler birbirinden uzaklaştırıldığında metal elektrotlar üzerinden bir elektron akışı meydana gelmektedir. Bu elektron akışı anlık potansiyel değişime bağlı olarak bir güç üretilmesine olanak sağlamaktadır [3].

Birbirinden farklı triboelektrik karakteristiği gösteren, yani farklı polaritedeki yüklere sahip malzemeler temas haline getirildiğinde triboelektrik etki (TEE) sebebiyle, karşılıklı yüzeyler birbirlerine zıt yüklerle yüklenirler. Elektronegatif ve elektropozitif özellikler gösteren malzemeler olarak adlandırılan bu yapıların bazıları Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 2. Elektronegatif ve elektropozitif özellikleri gösteren bazı malzemeler [4]

Yapıda yer alan katmanlar temas halinde olmayan yüzeylerinden metal elektrotlara bağlandığında, temas yüzeylerinin ayrılma hareketinden kaynaklı elektrostatik indüksiyon etkisi ile yük birikimine yol açar [5]. Yüzeylerde meydana gelen yük birikimi  $Q$  olarak tanımlanırsa, iki elektrot arasında oluşan başlangıç voltajı şöyle gösterilebilir [6];

$$V_{tr} = -\frac{Q \cdot d_{tr}}{\epsilon_0 \cdot S_{tr}} \quad (1)$$

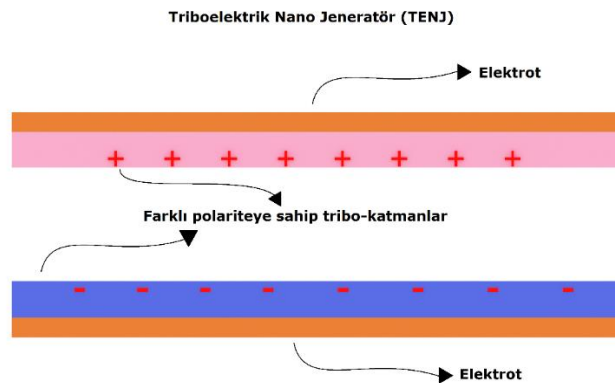
Verilen eşitlikte  $d_{tr}$  yüzeyler arasındaki uzaklığı,  $S_{tr}$  elektrotun yüzey alanını,  $\epsilon_0$  ise vakum ortamının elektriksel geçirgenliğini temsil etmektedir. Sıradaki denklem ise elektrotlar üzerinde indüklenen akımı ifade etmektedir [6];

$$I_{tr} = C_{tr} \frac{\partial V_{tr}}{\partial t} + V_{tr} \frac{\partial C_{tr}}{\partial t} \quad (2)$$

verilen denklemde  $C_{tr}$  sistemin kapasitansını belirtmektedir. Triboelektrik etki yapısal özellikler kadar yüzey morfolojisinden de etkilenir. Temas eden yüzeylerin iyileştirilmesi, TENJ çalışmalarında farklı hareket kombinasyonları kazandırılması, yüzey dayanımının artırılması sonucu daha hızlı çalışma periyotlarının uygulanabilmesi gibi durumları olağan hale getirecektir.

Mevcut çalışmalardan farklı olarak triboelektrik katman olarak kullanılan yüzeylerin yarı-iletken malzemelerden oluşturulması amaçlanmaktadır. Kullanılacak yarıiletken malzemeler mekanik olarak dayanıklı ve yapısal olarak yüksek elektron geçirgenliğine sahip materyallerden seçilmiştir. Bu özellikleri sayesinde yüzey yük yoğunluğunun artırılması ve çalışma dinamiklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Triboelektrik nanojeneratör (TENJ) ise; birbirinden farklı triboelektrik karakteristik gösteren malzemelerden oluşan katmanların birbirine tutturulması, bunların üzerlerine de yapıyı tamamlayıcı iletken metallerin büyütülmesi ve elektronik devrenin tamamlanması ile oluşturulan aygıttır [1-7].

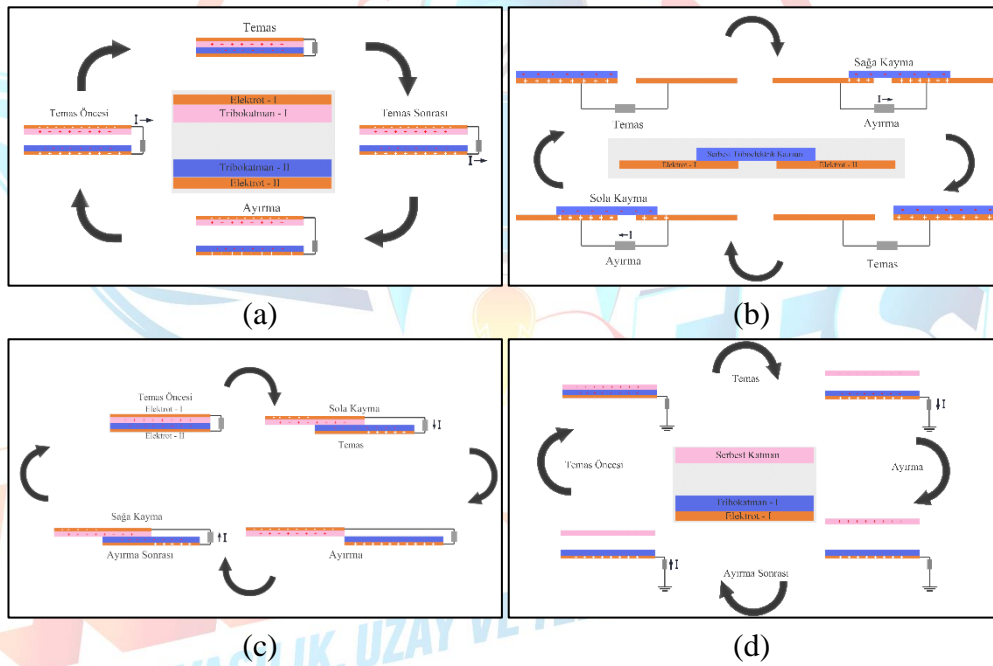


**Şekil 3.** Triboelektrik nanojeneratörün yapısal şeması

Triboelektrik nanojeneratörün dört temel çalışma prensibi vardır [8]. Bunlar temas-ayırma modu (şekil 4a), serbest tribo-katman modu (şekil 4b), yatay kayma modu (şekil 4c), ve tek elektrot modu (şekil 4d) olarak sıralanabilir. Temas-ayırma modunda farklı triboelektrik

karakteristiklerine sahip katmanlar, düşey ekseninde birbirine yaklaştırılıp uzaklaştırılmasıyla yüzeydeki statik yüklerin transferi gerçekleştirilir. Transfer edilen bu yükler elektrotlar yardımıyla aktarılabilir elektriksel bir güç çıktısı elde edilmiş olur. Yatay kayma modunda, katmanların yatay eksen boyunca birbiri üzerine sürtünmesiyle ortaya çıkan yükler elektriksel çıktıyı oluşturmaktadır. Serbest tribo-katman modunda farklı polariteye sahip katmanların birbiri üzerinde serbestçe hareket etmesi sağlanarak elektriksel çıktıya ulaşılır. Tek elektrot modunda ise çalışma dinamikleri temas-ayırma moduyla neredeyse aynıdır. Tek fark, katmanlar temas-ayırma hareketi sonucunda yükler ürettikten sonra, elektriksel çıktının sadece bir elektrot üzerinden elde edilmesidir.

Bu çalışma metodları arasında en verimli olduğu görülen temas-ayırma modudur. Bunun sebebi, kullanılan malzeme özelliklerine göre değişmekle beraber; kullanım esnasında oluşan malzeme deformasyonunun en az olması ve yük aktarımının daha verimli olmasıdır. Bununla birlikte atık enerjiyi toplamak için çevremizde gözlemlenen mekanik hareketlerin, temas-ayırma modundaki bir jeneratörü çalıştırmak için daha uygun olacağı düşünülmektedir.

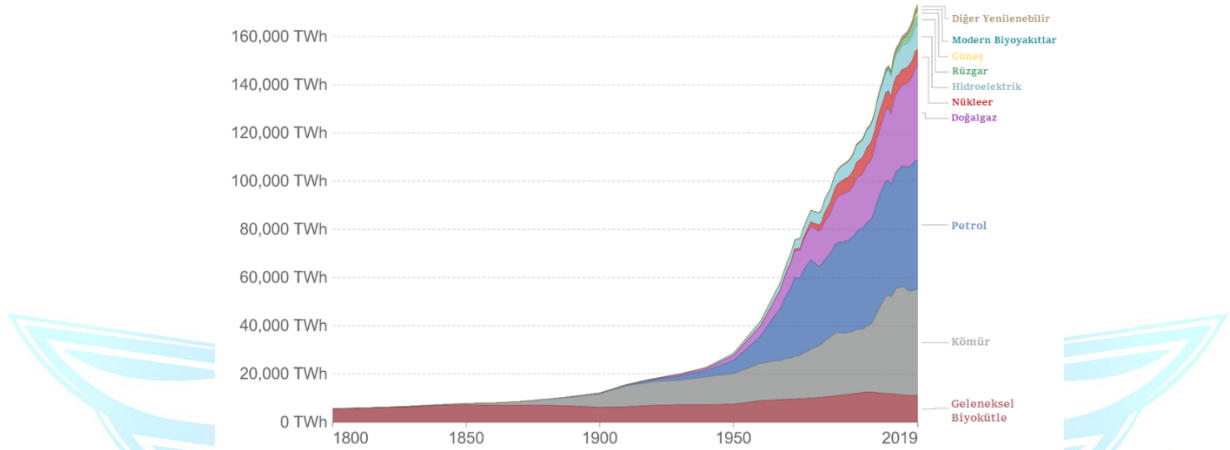


**Şekil 4.** Triboelektrik nanojeneratörün farklı çalışma modları (a) temas-ayırma modu, (b) serbest tribo-katman modu, (c) yatay kayma modu, (d) tek elektrot modu

Önerilen projede temas-ayırma modu prensibine dayanan bir triboelektrik nanojeneratör tasarlanmıştır. Triboelektrik katman olarak yarı-iletken malzemelerden büyütülmesi planlanan ince filmlerin sürtünme yüzeyinde kullanılması bu sayede de verimliliğin artırılması hedeflenmiştir. Magnetron kopartma sistemi kullanılarak Si-altaş üzerine büyütülecek bu ince film, TENJ içerisinde Cu elektrotla beraber yer alacaktır. TENJ'in ikincil elektrot kısmı ise PET/ITO yapısından oluşturulacaktır. Bu farklı iki kısım elektriksel bağlantılar ile birleştirilerek TENJ oluşturulacaktır. Üretilen TENJ'lerin elektriksel çıkış gücünde meydana getireceği potansiyel değişimleri incelenecektir.

## 2. Problem/Sorun:

Gezegeni paylaşan insan nüfusunun her geçen gün hızla artmasına paralel olarak, enerjiye duyulan ihtiyaç da günden güne artış göstermektedir. Bununla birlikte teknolojik gelişmeler, sanayi işletmelerindeki gelişmeler ve sanayide yüksek teknoloji kullanımı, elektriksel cihazların kullanımının artması gibi pek çok sebep de enerjiye duyulan ihtiyacın daha hızlı artmasına sebep olmaktadır. Sürekli artmakta olan bu enerji talebi, uzun yıllar fosil kaynaklı enerji üretim tesisleri ile karşılanmıştır. Fakat fosil kaynak kullanımı gün geçtikçe artmış ve doğaya salınan zararlı atıklar dünyamızı yüksek oranda kirletmeye başlamıştır.



Şekil 5: Küresel birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı [9]

Yakın tarihte daha yoğun kullanılmaya başlanan güneş, rüzgar, jeotermal, hidroelektrik vb. gibi yenilenebilir kaynaklardan yararlanan enerji santralleri de hizmete alınmış ve bu sorunun önüne geçilmeye çalışılmıştır. Her ne kadar enerji talebini karşılamak ve tabiatın korunması için bu adımlar atılmış olsa da, yenilenebilir kaynakların kesintisiz kullanımı sistemsel yetersizlikler, coğrafi olanaksızlıklar gibi sebeplerden dolayı mümkün değildir. Söz konusu şartlar göz önüne alındığında, tüm gelişmelerin yanı sıra enerji verimliliğinin artırılması ve kendi enerjisini üretebilen aygıtların kullanımının gerekliliği açıkça görülmektedir.

Triboelektrik etkinin büyüklüğünü artırmak için yüzey yük yoğunluğunu arttırmak gerekmektedir. Bu da etkili temas yüzeyi alanı, mikro ve nanoyapı koşulları değiştirilerek yapılabilmektedir. Özellikle, şu zamana kadar yapılan birçok çalışmada TENJ'lerde elektrot olarak polimer yüzeyleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak polimer yapılar üretilmesi kolay olmasına rağmen uzun süreli kullanımda kolayca deforme olduklarından dolayı istenilen performansı sağlayamamaktadır. Bu soruna çözüm olarak, uzun süreli performansı sağlamak ve polimerlerden daha hızlı elektron kaybetme özelliği olan malzemelerin TENJ içerisinde elektrot olarak kullanılması verimliliği arttıracak en önemli parametre olarak değerlendirilmektedir.

### 3. Çözüm

Ortaya koyulan bu projede kendi enerjisini üretebilen cihazların kullanımı ve ihtiyaç duyacakları enerjinin karşılanması için bir sistem önerilmektedir. Teknolojideki hızlı gelişmeler sonucunda gün geçtikçe cihazların ihtiyaç duydukları enerjiler azalmaktadır. Dolayısıyla yakın gelecekte TENJ ile birçok aygıtın enerjisi karşılanabilecektir. İhtiyaç duyulan bu enerji, şu anda çevremizde var olan ve kullanılmayan tamamen atık enerjilerden karşılanabilecektir. Örneğin yürürken ayaklarımızla ortaya çıkardığımız mekanik basma-çekme hareketi kullanılarak enerji üretilebilecektir veya kalp pillerinin ihtiyaç duyduğu enerji, kalbin hali hazırda var olan kan pompalama hareketi sayesinde karşılanabilecektir.

Günümüzde triboelektrik nanojeneratör (TENJ) üzerine yoğunlaşan birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda ortaya çıkan problemlerin başında, elde edilen güç çıktısının küçük olması ve sistem verimliliğinin düşük olması gelmektedir. Triboelektrik etkinin büyüklüğünü arttırmak için yüzey yük yoğunluğunu arttırmak gerekmektedir.

Önerilen bu projede hali hazırda kullanılan ve yüksek performans elde etme konusunda yetersiz kalan polimer elektrotların yerine, Sn/Zn/Ti bazlı yarıiletken yapılar kullanılacaktır. Bu sayede polimer katmanlardan daha yüksek elektron üretme potansiyeline sahip yarıiletken katmanlar kullanılarak, yüzey yük yoğunluğunun artırılması hedeflenmektedir. Yüzey yük yoğunluğundaki artış, üretilen güç çıktısına direkt olarak olumlu etki yapacak ve üretilen enerjide artış sağlayacaktır.

### 4. Yöntem

#### 4.1 İnce film üretimi

Önerilen projede triboelektrik sürtünme katmanı olarak kullanılacak ince filmler Si alttaş üzerine RF magnetron kopartma sistemi kullanılarak ince film formunda üretilmektedir. Üretilen ince filmin elektron akışını sağlamak için arka tarafına Cu elektrot büyümesi DC magnetron kopartma yöntemi ile gerçekleştirilecektir. Triboelektrik nanojeneratörün ikincil kısmını oluşturan PET/ITO (polyetilentetraflorat-indiyum kalay oksit) sürtünme elektrotu kullanılacaktır.

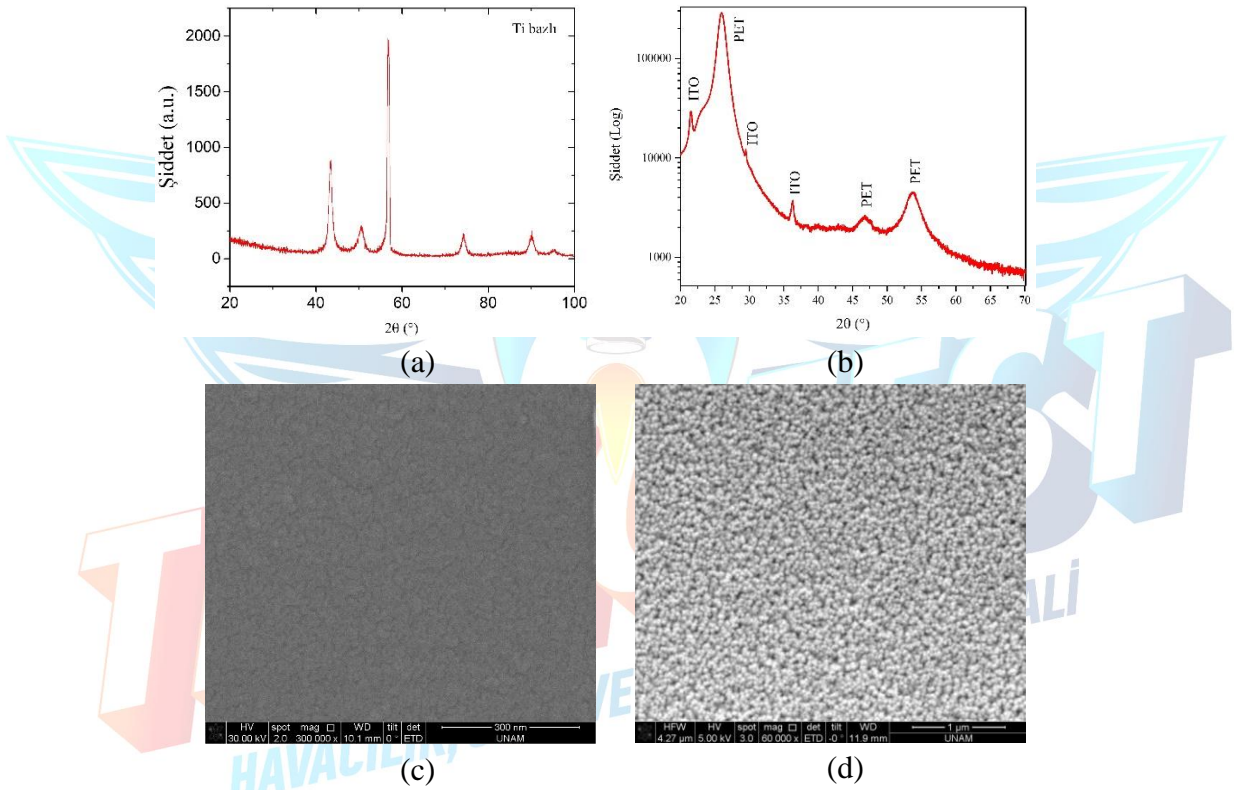
#### 4.2 İnce film karakterizasyonu

Üretilen ince filmlerin yapısal ve elektriksel karakterizasyonları X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM); akım-gerilim verileri ise kaynak metre (Şekil 6) kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 6. Kaynakmetre kullanılarak elde edilen zamana bağlı akım ölçümleri

Ti bazlı sürtünme katmanına sahip olan yarıiletken ince filme ait olan x-ışını kırınım deseni şekil 7a'da görülmektedir.  $2\theta=20^\circ-100^\circ$  arasında 0.02 adım aralığıyla yapılan ölçümler sonrasında elde edilen  $42^\circ$ ,  $51^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $74^\circ$ ,  $91^\circ$ 'lerdeki yansımaların literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [10]. Üretilen ince filmlerin yüzey topografisi özelliklerinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu görüntüsü şekil 7c'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlardan yüzeyin küresel parçacıklarla homojen bir şekilde kaplandığı gözlemlenmiştir. TENJ'in ikincil elektrot kısmını oluşturan PET/ITO'ya ait x-ışını kırınım deseni şekil 7b'de  $2\theta=20^\circ-70^\circ$  arasında 0.02 adım aralığıyla yapılan ölçümlerden polimer PET tabakasına ait olan yansıma pikleri  $27.5^\circ$ ,  $47.5^\circ$ ,  $55^\circ$ 'lerde gözlemlenirken ITO'ya ait olanlar  $23^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $36^\circ$ 'lerde gözlemlenmiştir. İnce filme ait olan taramalı elektron mikroskobu görüntüsü şekil 7d'de verilmiştir [11]. Ti bazlı üretilen ince filme nazaran parçacık büyüklüklerinin daha fazla olduğu ve yüzeydeki dağılımlarının homojen olduğu görülmüştür.

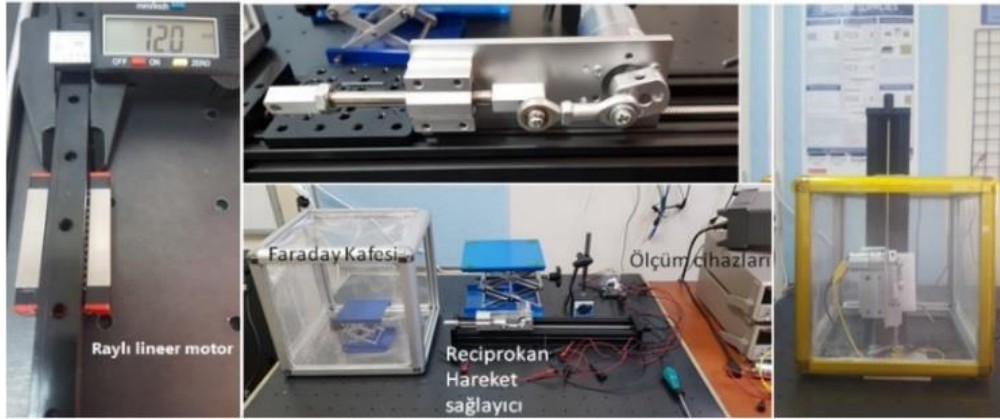


**Şekil 7:** (a) Ti bazlı sürtünme katmanı XRD Kırınım Deseni (b) PET/ITO sürtünme katmanı XRD Kırınım Deseni (c) Ti bazlı sürtünme katmanı SEM Görüntüsü (d) PET/ITO bazlı sürtünme katmanı SEM Görüntüsü

### 4.3 TENJ'in üretimi

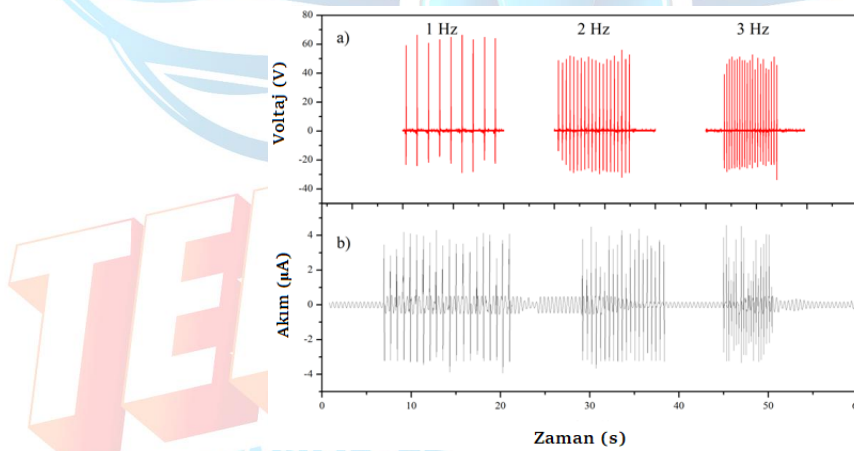
Üretilen ince filmler gerekli elektriksel bağlantıları yapıldıktan sonra iki plaka arasına yaylar kullanılarak birleştirilip, dikey temas-ayırma modunda çalışan bir TENJ oluşturulmuştur.





Şekil 8: Triboelektrik nanojeneratörün çalışma düzeneği

Temas ayırmanın düzgün bir frekansta sürülebilmesi için 24V DC motor 100 rpm' de çalıştırılmıştır. Motorun hareketinin aktarılabilmesi için lineer reciprokan aktuatör kullanılmıştır. Tüm elektriksel gürültülerin engellenebilmesi için Faraday Kafesi kullanılmıştır. Elde edilen çıkış voltajı bir elektronik devre yardımıyla LED'lere bağlanmıştır. TENJ'in çıkış gücünü hesaplamak için şekil 9'da gösterilen zamana bağlı akım ve voltaj eğrilerinden elde edilen değerler kullanılarak  $P = I^2 \times R$  formülü yardımıyla güç değeri hesaplanmıştır. Yaklaşık  $20 \mu W$ 'lık bir çıkış gücü elde edilmiştir. Elektronik devredeki yük direnç değeri  $1 M\Omega$  olarak seçilmiştir. Böylelikle projede 5 adet yeşil ticari LED (1 LED = 2.2 V) yakılmıştır.



Şekil 9: TENJ'den elde edilen zamana bağlı akım ve voltaj değerleri

## 5. Yenilikçi (İnovatif) Yönü

Triboelektrik katmanlar dielektrik özellikleri yüksek olan malzemelerden bir araya getirilmektedir. Yüzeylerin birbirine değmesi sonucunda aktarılan yüzey yüklerinin elektriksel yoğunluğunu arttırmak için yüzey hacim oranının artırılması gerekmektedir. Nanoteknolojik üretim teknikleriyle güncel, kontrollü ve verimliliği yüksek ince filmler üretilerek TENJ'lerde kullanılacak sürtünme katmanları elde edilecektir. Seçilen yarı-iletkenler hem elektriksel ve kapasitif yükleri açısından hem de mekanik özellikleriyle üstün birçok özelliğe sahiptirler.

Tüm bunların yanında öngörülen bu proje, yeni bir araştırma sahasının ülkemizde ve dünyada görülür hale gelmesine katkı sağlaması ve birçok yeni çalışmaya öncülük etmesi beklenmektedir. Bununla birlikte literatüre kaynak teşkil etmesi ve araştırmaların çeşitlendirilmesine olanak sağlayacağı beklenmektedir.

## 6. Uygulanabilirlik

Önerilen çalışmada triboelektrik özellikler gösteren yeni sistemlerin bulunması ve dünya çapında bu sistemlerin yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları olması nedeniyle elektrik üretme teknolojisinde kullanılmasının, hem teknolojik hem de mevcut bilim ve literatür açısından öneminin büyük olduğu görülmektedir. Bugüne kadar TENJ'lerin çıkış performansları üzerine elektriksel devre tasarımı ve sistem tasarımıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Atık enerjinin verimli bir hale dönüştürülmesini sağlayacak olan bu yapıların üretim süreci de diğerlerine kıyasla daha az maliyetli ve kolay olması nedeniyle göreceli olarak ucuz bir teknoloji olarak adlandırılabilir. Bu sebeple yüksek yatırım ve çalışma maliyetleri gerektirmez. Dolayısıyla ticari bir ürün haline getirilmek istendiğinde, diğer sistemlere kıyasla oldukça uygulanabilir durumdadır.

Özellikle küçük boyuttaki elektronik cihazları herhangi bir pil desteğine gerek kalmadan çalıştırmak için oldukça etkin bir yöntem olarak sunulmaktadır. Örnek vermek gerekirse, nesnelerin interneti olarak adlandırılan ve tüm cihazların birbiri ile iletişimde olduğu tüm cihazlara bağlı triboelektrik katmana sahip zeminler, hayati belirtileri ölçmek için akıllı giysilerdeki sensörler, fiziksel egzersizi izleyebilen ayakkabılar, orman yangını dedektörleri olarak otonom sensörler, cihazların kişiselleştirilmesinde kullanılan dokunsal sensörler, toz ve parçacık sensörleri, biyoteknolojide kullanılan biyo-uyumlu sensörler, otonom insan sağlığını izlemede kullanılan sensörler, kalp pili teknolojileri ve LED güç kaynağı gibi kullanım alanı gibi uygulanabilirlikleri birçok farklı sektöre ve oldukça geniş bir yelpazeye yayılmış durumdadır.

Söz konusu alanlarda birçok cihaza enerji kaynağı olarak kullanılacak bu jeneratörler, teknoloji ve literatürdeki gelişmeler ve ilerlemeler sayesinde uygun tasarımlar geliştirilerek makro boyutta enerji santrallerine dönüştürülebilme kapasitesine de sahiptirler. Dolayısıyla yakın gelecekte en temiz elektrik kaynakları olarak kullanılmaları muhtemeldir.

## 7. Tahmini Maliyet ve Proje Zaman Planlaması

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M972 proje numarası ile desteklenmiştir. Bu nedenle herhangi bir bütçe talep edilmemektedir.

| İş paketleri   | Durum             | Süre     |
|--|-------------------|----------|
| 1. İnce filmlerin üretimi  | Tamamlandı        | 0-6 ay   |
| 2. İnce filmlerin karakterizasyonu                                 | Tamamlandı        | 6-12 ay  |
| 3. TENJ'in üretilmesi  | Tamamlandı        | 12-18 ay |
| 4.TENJ'in karakterizasyonu   | Tamamlandı        | 18-20 ay |
| 5.Prototipin elektronik devreye bağlanması ve LED' lerin yakılması | Tamamlandı        | 20-24 ay |
| 6. Ticarileşme öncesi patent alınması                              | Başvuru sürecinde | 2 yıl    |

Piyasada ticarileşen ürünlerin tamamı ABD, Kore ve Çin'de bulunmaktadır. Ülkemizde henüz geliştirilen bir ürün yer almamaktadır. Ticarileşme maliyeti açısından ise üretim tekniği olarak piyasa koşullarına göre ileri teknolojik bir yatırım gereksinimi olan bu aygıtların başlangıçta maliyetlerinin yüksek olması beklenirken ileriki süreçte artan taleple beraber bunun azalacağı düşünülmektedir.

### 8. Proje Fikrinin Hedef Kitle (Kullanıcılar)

Atık mekanik enerjinin geri kazanımının yapılabileceği her noktada verimli olarak çalışması beklenen bu nano jeneratörlerin hedef kitle içerisinde sadece enerji üreten firmalar değil ileri teknoloji küçük elektronik cihazlar üreten firmalar da (Giyilebilir elektronik cihazlar, sağlık sensörleri, vb.) bulunmaktadır.

### 9. Riskler

Çalışmanın başlangıç aşamasında üretime bağlı içerdiği riskler TÜBİTAK projesi kapsamında olduğu için başlangıçta çözümlenmiştir. B planı kapsamında üretilen ince filmlerin özelliklerini geliştirmek için RF magnetron kopartma sistemi içerisinde büyütülen ince filmlerin kalınlık-büyütme basıncı, gücü, sıcaklık gibi parametreleri detaylıca incelenmiştir. Çalışmanın prototip olarak tamamlanması nedeniyle herhangi bir riski içermediği tanıtım videosundan da uygun şekilde çalıştığı görülmektedir.

## 10. Kaynakça

- [1] Wang Z.L., Song J., 2006, Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays, *Science*, 312: 242.
- [2] Vectormine, 2020, Static electricity vector illustration, charge energy explanation scheme. Retrieved from: <https://www.dreamstime.com/>
- [3] Yüzüak G., Karagöz C., Yüzüak E., 2022. Exploring the Sputtering Conditions in ZnO Thin Film for Triboelectric Nanogenerator Electrode, *Int. Energy Research*, Accepted.
- [4] Zhang, J., Darwish, N., Coote, M. L., & Ciampi, S. (2020). Static Electrification of Plastics under Friction: The Position of Engineering-Grade Polyethylene Terephthalate in the Triboelectric Series. *Advanced Engineering Materials*, 22(3), 1901201.
- [5] Yılmaz, N. D., 2021, Triboelektrik nanojeneratörler ile enerji hasadı: Teorik köken, çalışma prensibi ve çalışma modları. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 232-249.
- [6] Khalid, S., Raouf, I., Khan, A., Kim, N., & Kim, H. S., 2019, A review of human-powered energy harvesting for smart electronics: recent progress and challenges. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(4), 821-851.
- [7] Xia X., Fu J., Zi Y., 2019, A universal standardized method for output capability assessment of nanogenerators, *Nature Communications*, 10: 4428.
- [8] Wang, Z. L., 2013, Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS nano*, 7(11), 9533-9557.
- [9] Ritchie H., Roser M., Rosado P., 2020, "Energy". Published online at [OurWorldInData.org](https://ourworldindata.org/energy). Retrieved from: <https://ourworldindata.org/energy>
- [10] Chimupala, Y., Junpoy, P., Hardcastle, T., Westwood, A., Scott, A., Johnson, B., & Brydson, R., 2016, Universal synthesis method for mixed phase TiO<sub>2</sub> (B)/anatase TiO<sub>2</sub> thin films on substrates via a modified low pressure chemical vapour deposition (LPCVD) route. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(15), 5685-5699.
- [11] Herrero, J., & Guillén, C., 2002, Transparent films on polymers for photovoltaic applications. *Vacuum*, 67(3-4), 611-616.

### Teşekkür:

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M972 proje numarası ile desteklenmiştir.