

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOPLASTİK KEÇE ESASLI TRİBOELEKTRİK
NANOJENERATÖRLERİN ÇIKTI PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARYA YILMAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Adem YAR**

BİNGÖL-2022

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında her türlü desteği sağlayan, bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, her türlü sorunlarımı çözen ve liderliği ile yanımda olan tez danışmanım Doç. Dr. Adem YAR'a teşekkürü borç bilir, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca yaptıkları yorum ve yönlendirmeleriyle tez çalışmamın noksansız olmasını sağlayan değerli jüri üyelerim Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim OKBAZ ve Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER hocalarıma sonsuz teşekkür ederim. Bu tez çalışmasında gerek teorik gerekse laboratuvar bilgilerini benimle paylaşan ve her daim yanımda olan yüksek lisans arkadaşım Zeynep KINAŞ'a, Lisans hocam Arş. Gör. Anıl İMAK hocama ayrıca teşekkür eder şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın hazırlanmasında bana her türlü desteği verip sabır ve fedakârlıkla beni destekleyen kıymetli; annem, babam ve kardeşime minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Arya YILMAZ

Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ÖNSÖZ..... | i |
| İÇİNDEKİLER..... | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | iii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | iv |
| TABLolar LİSTESİ..... | viii |
| ÖZET..... | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ..... | 4 |
| 2.1. Triboelektrik Nanojenatörlerin Temel Esasları..... | 8 |
| 2.2. TENG'lerin Çalışma Prensipleri..... | 9 |
| 2.3. TENG ile Enerji Üretimi | 13 |
| 2.4. TENG için Malzeme Seçiminin Önemi..... | 15 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 19 |
| 3.1. TENG Cihazının Üretimi | 21 |
| 3.2. Malzeme Karakterizasyonu..... | 22 |
| 3.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)..... | 22 |
| 3.2.2. Optik ve Profilometre Mikroskobu | 23 |
| 3.3. TENG'in Elektriksel Parametrelerinin Ölçümü..... | 24 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 27 |
| 4.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri..... | 27 |
| 4.2. Optik mikroskop ve Profilometre..... | 29 |
| 4.3. TENG'lerin Elektriksel Çıktı Performansları..... | 32 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 48 |
| KAYNAKLAR..... | 50 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 55 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|--------------|---|
| Q_f | : Yüzeylerdeki yük birikimi |
| V_{tr} | : iki elektrot arasındaki başlangıç voltajı |
| e^- | : Elektron yükü |
| d_{tr} | : Hücreler arası uzaklığı |
| eV | : Elektron volt |
| S_{tr} | : Metal elektrotun yüzey alanı |
| I_{tr} | : Dış elektrotlarda indüklenen akım |
| C_{tr} | : Sığa |
| I | : Akım (A) |
| J | : Akım yoğunluğu (A/cm^2) |
| J_0 | : Ters beslem akım yoğunluğu (A/cm^2) |
| μ | : Mobilite ($cm^2/V.s$) |
| ϵ_0 | : Boşluğun dielektrik sabiti |
| χ_s | : Yarıiletkenin elektron ilgisi |
| T | : Mutlak sıcaklık (K) |
| $g_c(E)$ | : İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu |
| I_0 | : Ters doyma akımı (A) |
| m | : Serbest elektronun kütlesi |
| m_n^* | : Elektronun etkin kütlesi |
| K | : Kelvin |
| P | : Güç (Watt) |
| FF | : Doldurma faktörü (%) |
| V_{oc} | : Açık devre voltajı (V) |
| I_{sc} | : Kısa devre akımı (A) |
| MEMS | : Mikro Elektro Mekanik Sistem |
| I-V | : Akım-voltaj |
| PI | : Poliimid |

| | |
|------------|--------------------------------|
| <i>PPS</i> | : Polifenilen Sülfid |
| PEEK | : Polietereterketon |
| PEI | : Polieterimid |
| GP | : Poliimid bağlayıcı ince cam |
| TFP | : Technical fibre products |
| ITO | : İndium tin oxide |
| OP | : Optik Mikroskop |
| SEM | : Taramalı elektron Mikroskopu |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | | |
|------------|---|----|
| Şekil 2.1. | Dikey-temas ayrılma modlu TENG çalışma prensibi (Wang,2019)..... | 10 |
| Şekil 2.2. | İki atom arasındaki atomlar arası etkileşim potansiyeli ve ikisi arasındaki kuvvet, (a) denge konumunda, (b) itici bölgede güçlü elektron bulutu/dalga fonksiyonu çakışması ve (c) çekici bölgede elektron bulutu/dalga fonksiyonu zayıf etkileşimi. Genel malzemeler için, iyi tanımlanmış enerji bandı yapısına sahip olmayan iki malzeme arasında temas elektriklenmesi ve yük transferini açıklamak için önerilen bir elektron bulutu-potansiyel-kuyu modeli (Wang,2019)..... | 11 |
| Şekil 2.3. | TENG Modeli | 15 |
| Şekil 3.1. | PEI'nin kimyasal yapısı..... | 19 |
| Şekil 3.2. | PPS'nin kimyasal yapısı..... | 20 |
| Şekil 3.3. | PEEK'in kimyasal yapısı..... | 20 |
| Şekil 3.4. | PI'nin kimyasal yapısı..... | 21 |
| Şekil 3.5. | PEEK, PPS, PEI, PI ve GP termoplastik keçeler için a-) 3 kat katman, b-) 6 kat katman, c-) 7 kat katman ve d-) çok hücreli TENG'lerin görüntüsü..... | 22 |
| Şekil 3.6. | Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)..... | 23 |
| Şekil 3.7. | Stylus Profilometre / NanoMap/ LS Optik ve profilometre Mikroskop Cihazı | 24 |
| Şekil 3.8. | Rigol marka osiloskop ve darbe sağlayıcı | 26 |
| Şekil 4.1. | GP termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri.... | 27 |
| Şekil 4.2. | PEEK termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri..... | 27 |
| Şekil 4.3. | PEI termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri.. | 28 |
| Şekil 4.4. | PI termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri.. | 28 |
| Şekil 4.5. | PPS termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri.. | 29 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 4.6. | Polimide ince cam bağlayıcı termoplastik keçe için Optik ve profilometre Mikroskop Görüntüleri | 30 |
| Şekil 4.7. | PEEK termoplastik için Optik ve profilometre Mikroskop Görüntüleri | 30 |
| Şekil 4.8. | PEI termoplastik keçe için Optik ve profilometre Mikroskop Görüntüleri | 30 |
| Şekil 4.9. | PI termoplastik keçe için Optik ve profilometre Mikroskop Görüntüleri..... | 31 |
| Şekil 4.10. | PPS termoplastik keçe için Optik ve profilometre Mikroskop Görüntüleri..... | 31 |
| Şekil 4.11. | 1 kat kalınlığındaki farklı termoplastik keçelerin. a) anlık voltaj eğrileri, b) kapasitör voltaj eğrileri, c) çıkış güç eğrileri, d) farklı dirençler altında gerilim eğrileri, e) farklı dirençler altında akım eğrileri ve f) PEEK için farklı kapasitif yükler..... | 33 |
| Şekil 4.12. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için voltaj değerleri voltaj-zaman grafikleri..... | 35 |
| Şekil 4.13. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için akım- zaman grafikleri..... | 38 |
| Şekil 4.14. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için güç- zaman grafikleri..... | 39 |
| Şekil 4.15. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için voltaj- zaman grafikleri.... | 40 |
| Şekil 4.16. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için yük- zaman grafikleri..... | 41 |
| Şekil 4.17. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için enerji- zaman grafikleri.... | 42 |
| Şekil 4.18. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için voltaj- zaman grafikleri..... | 44 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 4.19. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanları kullanılarak üretilen çok hücreli TENG'ler için tek darbeye karşılık gelen kapasitör şarj-deşarj eğrileri..... | 45 |
| Şekil 4.20. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için yük eğrileri..... | 46 |
| Şekil 4.21. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanları kullanılarak üretilen çok hücreli TENG'ler için enerji eğrileri..... | 47 |

TABLolar LİSTESİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Tablo 2.1. | Triboelektrik seri (Khalid, 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu, 2018)..... | 16 |
| Tablo 4.1. | GP, PEEK, PEİ, PI, ve PPS termoplastik keçeler için yüzey pürüzlülüğü (Ra), Ortalama karekökü (RRMS) ve tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) değerleri..... | 32 |
| Tablo 4.2. | 1 Kat kalınlığındaki farklı termoplastik keçelerin çıkış voltajları, kapasitör voltajları, çıkış güçleri, farklı dirençler altında akım değerleri | 34 |
| Tablo 4.3. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için voltaj değerleri..... | 36 |
| Tablo 4.4. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için akım değerleri..... | 38 |
| Tablo 4.5. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için güç değerleri..... | 40 |
| Tablo 4.6. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için voltaj değerleri..... | 41 |
| Tablo 4.7. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için yük değerleri..... | 42 |
| Tablo 4.8. | Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanarak üretilen TENG'ler için enerji değerleri..... | 43 |
| Tablo 4.9. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçeler için optimum katmanları kullanılarak üretilen çok hücreli TENG'ler için voltaj değerleri..... | 44 |
| Tablo 4.10. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçeler için optimum katmanları kullanılarak üretilen çok hücreli TENG'ler için yük değerleri..... | 46 |
| Tablo 4.11. | GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçeler için optimum katmanları kullanılarak üretilen çok hücreli TENG'ler için enerji değerleri..... | 47 |

TERMOPLASTİK KEÇE ESASLI TRIBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÇIKTI PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Triboelektrik nanojeneratör (TENG), yaygın olan mekanik hareketleri toplayarak elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Günümüzde, TENG'lerin enerji verimliliği düşüktür bu nedenle kendi kendine çalışan elektronik cihazları çalıştırmak için kullanılmamaktadır. Elektronik cihazlarda enerji kaynağı olarak kullanılması için TENG'in güç performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, enerji verimliliği, daha yüksek elektrik şarj kapasitesine sahip yeni dielektrik malzemeler kullanılarak artırılabilir. Bu amaçla, bu çalışmada tribo-katmanlar olarak % 2,5 Al katkılı silikon ve termoplastik keçeler (Poliimid (PI), Polifenilen Sülfid (PPS), Polietereterketon (PEEK), Polieterimid (PEI) ve Poliimid bağlayıcı ince cam (GP)) kullanılarak TENG üretilmiştir. Üretilen bu TENG biyomekanik enerji üretimi için uygun bir dikey temas ayırma modu kullanılarak tasarlanmıştır. Termoplastik keçelerin yüzey morfolojisi için taramalı elektron mikroskopu (SEM), profilometre ve optik mikroskop kullanılmıştır. Termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) kullanılarak üretilen TENG'lerin çıkış güçleri, voltajları ve akımları ölçüldü. İlk olarak tek katman termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) elektriksel ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlere göre en iyi güç çıktısını veren malzemenin PEEK olduğu belirlendi. PEEK kullanılarak üretilen TENG'in maksimum çıkış gücü 37.48 mW olarak hesaplanmıştır. İkinci olarak TENG'lerin çıkış gücünü iyileştirmek için termoplastik keçelerin (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) katman sayısı artırılarak elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada GP, PEEK, PEI, PI ve PPS termoplastik keçeleri için optimize katman sayıları sırasıyla 2, 2, 6, 5 ve 2 olarak belirlenmiştir. Bu termoplastik keçeler arasında iyi elektriksel çıkış performansı sergileyen PEI termoplastik keçesi olduğu belirlenmiştir. PEI termoplastik keçesinin anlık voltajları tek katmanda 446 V iken 6 kat katmanda 500 V olarak ölçülmüştür. Yani PEI termoplastik keçesinin katman sayısı artırılarak PEI termoplastik keçesinin anlık voltajı %12,1 kat artırılmıştır. Son olarak katman optimizasyonu yapılan termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) için çok hücreli TENG fabrikasyonu yapıldı. Çok hücreli TENG tasarımında tüm termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) anlık voltaj sabit kalırken kapasite geriliminin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlere bakıldığında katman sayısındaki artış ve çok hücreli TENG kullanımının TENG'in çıktı performanslarında önemli bir katkısı olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Termoplastik keçe, silikon, triboelektrik nanojeneratörler, enerji üretimi, elektrostatik indüksiyon.

INVESTIGATION OF THE OUTPUT PERFORMANCES OF THERMOPLASTIC VEIL- BASED TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS

ABSTRACT

Triboelectric nanogenerator (TENG) generates electricity by collecting common mechanical movements. It is a device that converts energy. Nowadays, TENGs have low energy efficiency and are therefore not used to power self-powered electronic devices. To be employed as an energy source in electronic equipment, TENG's power performance needs to be enhanced. Therefore, by utilizing novel dielectric materials with greater electrical charging capacity, energy efficiency can be raised. For this purpose, in this study, TENG was fabricated by using 2.5% Al added silicon and thermoplastic veils Polyimide (PI), Polyphenylene Sulphite (PPS), Polyetheretherketone (PEEK), Polyetherimide (PEI) and Polyimide binder thin glass (GP)) as tribo-layers. This TENG fabricated was designed using a vertical contact separation mode suitable for biomechanical power generation. Scanning electron microscope (SEM), profilometer and optical microscope were exploited for the surface morphology of thermoplastic veils. Output powers, voltages and currents of TENGs fabricated using thermoplastic veils (GP, PEEK, PEI, PI and PPS) were successfully measured. First, electrical measurements of single layer thermoplastic veils (GP, PEEK, PEI, PI and PPS) were carried out. According to the achieved measurements, it was determined that the material that gave the best power output was PEEK. Secondly, to enhance the output power of TENGs, electrical measurements of thermoplastic veils (GP, PEEK, PEI, PI and PPS) were achieved by increasing the layer. In the study, optimized layer for GP, PEEK, PEI, PI and PPS thermoplastic veils were determined as 2, 2, 6, 5 and 2 layers, respectively. The instantaneous voltages of the PEI thermoplastic veil were measured as 446 V in a single layer and 500 V in 6 layers. In other words, by increasing the layers of the PEI thermoplastic veil, the instantaneous voltage of the PEI thermoplastic veil was increased by 12.1%. Finally, multi-cell TENG fabrication was performed for layer optimized thermoplastic veils (GP, PEEK, PEI, PI and PPS). In the multi-cell TENG design, it was observed that the capacitance voltage increased while the instantaneous voltage remained constant for all thermoplastic veils (GP, PEEK, PEI, PI and PPS). Based on the measurements, it is possible to conclude that increasing the number of layers and using multi-cell TENG have a significant influence on TENG output performance.

Keyword: Thermoplastic veil, silicon, triboelectric nanogenerators, energy harvesting, electrostatic induction.

1. GİRİŞ

21. yüzyıl teknolojinin hızla büyüyen ve geliştiği bir çağdır. Elektronik cihazların gelişimi ve bu elektronik cihazların portatif hale gelmesiyle teknoloji insan hayatında oldukça vazgeçilmez bir yere sahip olmuştur. Özellikle telefonlar, bilgisayarlar, sensörler gibi cihazlar günümüzde kullanılan en önemli elektroniklerdir. Zaman geçtikçe elektronik cihazlar çok daha küçük ve kompakt hale geldi aynı zamanda işlevleri de arttı. Birçok cihaz kendi aralarında veri alışverişi yapabilmektedir. Veri toplamanın günlük hayatta artan önemi, sensör, yazılım ve diğer teknolojilere sahip milyonlarca cihazdan oluşabilen ağlarının ihtiyaç duyduğu toplam enerji miktarını önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca taşınabilir, implante edilebilir ve giyilebilir elektronik cihazların yaygınlaşması taşınabilir ve sürdürülebilir güç kaynağına olan ihtiyacın ön plana çıkmasına neden olmuştur. Fosil yakıtlar, 20. yüzyıldan itibaren teknolojik gelişmeler ve seri üretim için vazgeçilmez bir enerji kaynağı olmuştur. Ancak bu kaynakların miktarlarındaki azalma beraberinde enerji krizi endişelerini de getirmiştir. Ayrıca fosil yakıtların hava kirliliği, su kirliliği, küresel ısınma gibi olumsuz etkileri de dünyayı tehdit etmektedir. Elektronik cihazlara güç sağlamanın diğer bir bilindik yolu geleneksel pil kullanmaktır. Piller nispeten büyük ve belirli cihazlar için kullanışlı olsa da; birçok dezavantajı vardır. Pillerin genellikle sınırlı bir ömrü vardır ve periyodik olarak değiştirilmeleri veya yeniden şarj edilmeleri gerekir. Ayrıca ürettikleri kimyasallar hem çevre hem de insan vücudu için toksik özelliklere sahiptir (Zou, 2020; Wu, 2019). Bu yüzden, enerji talebini karşılamak ve çevre sorunlarını çözmek için güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi ve dalga enerjisi gibi sürdürülebilir enerji kaynakları kullanarak güç üretmek için yeni teknikler ve teknolojiler geliştirilmektedir. Bunlar arasında, 2012 yılında Zhong Lin Wang ve çalışma arkadaşları tarafından keşfedilen triboelektrik nanojeneratörler (TENG) son yıllarda büyük bir ilgi çekmektedir. TENG, triboelektrik etki ve elektrostatik indüksiyon arasındaki etkileşim esasına bağlı yeni ve benzersiz bir mekanizmaya sahiptir. Yüksek güç yoğunluğu, hafiflik, küçük boyut, düşük maliyet, esneklik ve hatta şeffaflık dahil olmak üzere diğer gelişmiş mevcut teknolojilere göre benzersiz avantajlara sahiptir. 2012'deki ilk çalışmadan bu yana çok hızlı bir şekilde gelişmekte ve küresel ölçekte kapsamlı araştırmaların büyük bir ilgisini çekmektedir. Su dalgaları, rüzgâr, titreşim ve insandaki kalp atışı gibi çok çeşitli mekanik enerjiyi toplamak için çeşitli cihaz yapıları tasarlanmaktadır (Fan, 2012). Böylece TENG'lerin çıkış gücü, gelişmiş cihaz tasarımı yoluyla önemli ölçüde artırılarak bu teknolojinin enerji uygulamalarındaki çekiciliği gösterilmektedir. TENG ortamda bulunan farklı boyutlardaki mekanik enerjiyi kullanarak elektrik enerjisi üretebilir. Su dalgaları, rüzgâr, titreşim ve insandaki kalp atışı gibi faaliyetlere yaygın olarak bulunan mekanik enerji kaynakları olmasına rağmen, düşük frekanslara ve değişken genliklere sahip olmaları nedeniyle bu enerjileri yüksek verimle depolamak oldukça güçtür (Choi, 2017; Chen, 2015). TENG'lerin olumlu yanlarını bir araya getiren ve olumsuz yönlerini ortadan kaldıran hibrit nanojeneratörler, daha önce bazı araştırmacılar tarafından test edilmiş ve tatmin edici performans çıktıkları elde edilmiştir. Örneğin; Dalga enerjisini daha etkin kullanmak ve TENG'lerle çok daha büyük ölçekte güç üretmek için Wang ve arkadaşları (Wang, 2017) kilometrekarelik bir alana yayılmış milyonlarca TENG'i yüzen kablolarla balık ağları gibi

birbirine bağıladığı düşünölen TENG ağıları fikrini önerdi. Bu alandaki çalışmalar, okyanusların mavi enerjisinden büyük ölçekli elektrik enerjisi üretmek için TENG ağıının uygun bir yaklaşım olduğunu göstermiştir (Liang, 2019; Chen, 2015). Rüzgâr enerjisi de tıpkı dalga enerjisi gibi sürdürülebilir, bol ve yaygın olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Çeşitli yapısal formlarda geliştirilen TENG tasarımları ile hem büyük ölçekli elektrik üretimi yapılabilmekte hem de rüzgâr enerjisi hasat teknolojilerinde sensörlerin enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir (Zheng, 2015; Zhang, 2016; Yang, 2013; Su, 2014). Rüzgâr türbinlerinden farklı olarak, TENG'lerin büyük ölçekli hareketli bileşenlerinin olmaması, daha sessiz ve canlılara zarar vermeden çalışmalarını sağlar, ayrıca daha düşük hızlarda ve düzensiz rüzgârlarda bile elektrik üretirler. TENG'ler yapılarına ve triboelektrifikasyon mekanizmalarına bağılı olarak; dikey temas ayırma modu (Okbaz, 2022; Zhu, 2013), yanal kayma modu (Wang, 2013), tek elektrot modu (Yang, 2013) ve serbest triboelektrik katman modu (Wang, 2014) olmak üzere dört farklı modda üretilebilir. Dikey temas-ayırma modu, TENG'lerin tasarlanan ilk formudur. Elektrik akımı oluşturmak için iki yüzeyin devirli biçimde temas ve ayrılma hareketi yapmasından yararlanır. Düzlem içi kaydırma modu, ilk olarak Wang ve ekibi tarafından 2013 yılında geliştirilmiştir (Wang, 2013). Bu mekanizma, düzlemsel, disk rotasyon ve silindirik rotasyon hareketleri için kullanılabilir (Khalid, 2019). Tek elektrotlu mod, düzlem içi kaydırma modunun geliştirildiği yıl olan 2013 yılında Wang ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Yang, 2013). Tek elektrotlu mod genelde bir topraklanmış elektrot, hareketli aktif eleman ve sürtünme tabakası içerir. Serbest triboelektrik tabaka modu, ilk olarak Wang ve arkadaşları tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir (Wang, 2014). Bu mod, farklı konfigürasyonlar kullanılarak uygulanabilmektedir. Burada, iki sabit metal elektrot ve serbest hareket eden bir triboelektrik tabaka mevcuttur.

Bu çalışmada çevredeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yeni bir enerji üretim cihazı olan triboelektrik nanojeneratörler (TENG) genel olarak incelendi. Tribo-katmanlar olarak %2,5 Al katkılı silikon ve termoplastik keçeler (Poliimid (PI), Polifenilen Sülfid (PPS), Polietereterketon (PEEK), Polieterimid (PEI) ve Poliimid bağlayıcı ince cam (GP)) kullanılarak TENG üretimi gerçekleştirildi. TENG modlarından dikey temas ayırma modu kullanılarak yapıldı. Termoplastik keçelerin yüzey morfolojisi için taramalar yapılarak yorumlandı. Termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) kullanılarak üretilen TENG'lerin çıkış güçleri, voltajları ve akımları ölçölüp, tek katman için termoplastik keçelerin (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) elektriksel çıkış ölçümleri yapıldı. 1 kat katman için elde edilen çıkış verileri elde edildi ve ardından termoplastik keçelerin (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) katman sayıları arttırılarak elektriksel ölçümleri yapıldı. Son olarak katman optimizasyonu yapılan termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) için çok hücreli TENG fabrikasyonu yapılarak elektriksel çıkış verileri incelenerek yorumlandı.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Triboelektrik, dünyadaki en eski bilimsel araştırma alanlarından biridir. Antik geçmişte, malzemenin kehribar üzerine sürtünmesi ile ilişkilendirilmesi nedeniyle, elektrostatik etki halk arasında “kehribar etkisi” olarak bilinmektedir (Lacks, 2012). O dönem “elektrik”, Yunanca kehribar “elektra” (Smythe, 1989) kelimesinden türetilmiştir ve 'triboelektrik' kelimesi Yunanca'da 'sürtünme kehribar' anlamına gelmektedir (Magie, 1969). Erken dönemlerin “teorik çalışması” konusunda oldukça başarılı bir bilim adamı olan William Gilbert, Yunan bilim adamlarının, statik elektrik üzerinde çok az deneysel çalışma yürüttükleri için (Bailey, 2001), “elektrik” olarak adlandırdığı diğer birçok malzemenin nesnelere ovulduğunda sürtünerek elektrik üretmek; çekme yeteneğine sahip olan sadece kehribar olmadığını açıklamıştır (Magie, 1969).

18. yüzyılın başlarında, başka bir İngiliz bilim adamı “Stephen Gray” nesnelere metal bir "elektrik erdemi" ile birleştirildiğinde, bir nesneden diğerine aktarıldığını keşfetti ve bununla birlikte yalıtkanlar ve iletkenler arasındaki ayrımın anlaşılmasına yol açan bir deney yapmıştır (Olenick, 1986; Magie, 1969). Temas ve ayırma süreciyle elektrik yükü üretme çalışmaları malzemelere sıklıkla 'temaslı elektrifikasyon' veya 'temas şarjı' denir. Malzemeler birbirine sürtüldüğünde “sürtünmeli elektrifikasyon”, “triboelektriklenme”, “triboelektrik şarj” veya “tribo şarj” olarak adlandırılabilir.

Paradiso ve arkadaşları 2005'te Nesnelere İnterneti (IoT) adlı çalışmalarında, mekanik ve dijital makineleri, bilgi işlem cihazlarını, hayvanları ve hatta bilgi üretebilen ve diğer nesnelere paylaşabilen insanları birbirine bağladılar. IoT, sağlık izleme, tıbbi bakım, çevre koruma, altyapı izleme ve güvenlik hizmetleri için geniş çapta dağıtılmış mobil cihazlara ve sensörlere ihtiyaç duymaktadır. Dağıtılmış her sensör tek başına çok az güç tüketse de, milyarlarca ve trilyonlarca sensörün toplam güç tüketimi yüksek seviyelere ulaşabilir. Mobil elektronik cihazlar ve kablosuz sensörler son zamanlarda önemli ölçüde geliştirildiğinden, küçük boyutlu enerji toplayıcıların önemi hızla artmaktadır. Küçük boyutlu enerji toplayıcıların birincil amacı, pillerin çalışma süresini uzatmak ve nihayetinde pil gerektirmeyen kendi kendine çalışan sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktır (Paradiso, 2005).

Wang ve arkadaşları 2017'de elektrik enerjisini ortamdan üretebilen cihazlar sayesinde IoT'yi oluşturan sensörlerin sürdürülebilir bir şekilde çalıştığını öne sürmüştür. Bu sensörler, kendi kendine güç sağlayan sistemleri geliştirmek için önemli bir neden olup, daha fazla çalışma alanı sağlamaktadır (Wang, 2017). Bu noktada TENG'ler, elektrik üretebilen ve enerji arzındaki önemli bir boşluğu doldurabilen cihazlar olarak karşımıza çıkmaktadır. İnsan vücudunun biyomekanik enerjisini toplayan TENG'ler giyilebilir ve taşınabilir cihazlar için uygun güç kaynaklarıdır. Çünkü hafif olmaları, çevreye zarar vermeyen malzemelerle ve insan vücudu ile uyumlu yapısal formlarda enerji üretilebilirler. İnsan vücudunun farklı hareketli parçaları ve uzuvları, günlük

aktivitelere, yaşa ve ağırlığa bağlı olarak farklı miktarlarda kullanılabilir mekanik enerji içermektedir. Örneğin 80 kg'lık bir insan vücudunun 1 Hz'lik yürüme frekansında topuklar, ayak bilekleri, dizler, kalçalar, dirsekler ve omuzlar için sırasıyla 20 W, 66,8 W, 36,4 W, 38 W, 2,1 W ve 2,2 güç üretebilirler (Wang, 2019). İnsan vücudunun biyomekanik enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten çeşitli çalışma modlarında ve yapısal formlarda üretilen TENG'ler tatmin edici sonuçlar vermiştir (Liu, 2019; Zou, 2020). Giyilebilir TENG'ler, TENG'lerin en ufak ve düzensiz mekanik çalkantıları algılama ve bunları elektrik enerjisine dönüştürme yeteneği sayesinde, baş ve boyun gibi sınırlı hareket serbestliğine sahip vücut parçaları için bile üretilmiştir (Wang, 2018; Wang, 2019). Göğüs ve bel, solunum aktivitesi nedeniyle düzenli bir mekanik hareket kaynağıdır ve bu enerjiyi toplamak için çeşitli tekstil yapılarındaki TENG'ler önerilmiştir (Huang, 2019; Yi, 2015) İnsan kolu, yüksek frekanslı, geniş genlikli ve karmaşık hareketler yapabilen bir vücut uzvudur. Nispeten büyük miktarda mekanik enerji, insan kolu üzerinde bulunan çeşitli TENG'ler ile elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Parmak (Zhu, 2019; Das, 2019), bilek (Yang, 2015; Das, 2019; Mule, 2019), dirsek (Wu, 2019; Gogurla, 2019; Lee, 2015) ve bacak (Zhang, 2018; Ahmed, 2019) hareketlerinin enerjisini kullanan giyilebilir elektronik cihazlar için çeşitli formlarda tasarlanmış esnek TENG çeşitleri bulunmaktadır. Eşsiz çalışma prensibi ve kimyasal eylemsizliği, biyolojik olarak uyumlu ve hatta biyolojik olarak parçalanabilen polimer malzemeleri sayesinde, TENG'ler nabız dalgalarını ölçebilir ve invivo deneylerde kanıtlandığı gibi insan kardiyovasküler sisteminden gelen küçük titreşimleri kullanabilir (Choi, 2017; Liu, 2019). TENG katı-katı ve sıvı-katı durumlarda temaslı elektrifikasyonda elektron transferinin temel bilimsel anlayışını ve elektrikli çift katmanın oluşumu için yeni revize edilmiş bir model sunmaktadır. Enerji kaynakları ve sensörler olarak triboelektrik nanojeneratörlerin potansiyel devrimci etkileri sağlık, çevre bilimi, giyilebilir elektronik, nesnelere interneti, insan-makine arayüzü, robotik ve yapay zekâ alanlarında kolaylıklar sunmaktadır (Wang, 2020).

Sun ve arkadaşları 2020'de TENG'lerin (M-TENG) çıktı performansını etkin bir şekilde arttırmak için tribo-malzeme olarak bir manyetik polimerik kompozit film kullandılar. Sertleştirilmiş manyetik akı yoğunluğunun, dolgu partikül konsantrasyonunun ve partikül boyutunun etkisi üzerinde çalışıldı. Bu çalışma sonucunda 32,6 μ A (kısa devre akımı) ve 233.4 V (açık devre voltajı) çıktısı elde edildi. 3 M Ω 'luk bir yükleme direnci altında M-TENG'den 2.5 mW elde edildi ve saf silikon kauçuk karışım filmine (0.53 mW) dayanan TENG'den 4,7 kattan fazla iyileştirme sağladığı görüldü (Sun, 2020).

Kınaş ve arkadaşlarının 2021'de yaptığı başka bir çalışmada, Naylon 6.6'nın triboelektrik özelliklerinin AgSbS₂ nanokristallerin tanıtımı ve elektro eğirme tekniği ile önemli ölçüde geliştirilebileceğini gösterdi. Bu nedenle, yüksek performanslı, ağırlıkça %10 AgSbS₂ @Naylon 6.6 nanofiber bazlı TENG, üstün pozitif triboelektrik malzeme olarak dikkate değer bir şekilde geliştirildi ve Naylon 6.6 nanofiberlerde AgSbS₂ nano kristallerinin dağılımı ve dielektrik özelliği sayesinde sinerjik bir etki ortaya çıkardı. Ağırlıkça %10 AgSbS₂ @Naylon 6.6 nanofiber bazlı TENG, maksimum ~546 V çıkış voltajı ve ~6,81 W/m maksimum güç yoğunluğu ile olağanüstü triboelektrik özellikler sergiledi. AgSbS₂ @Naylon 6.6 nanofiber bazlı TENG'nin çıkış voltajındaki artış, bunların hepsine atfedildi. Bu nedenle, çalışma, nanofiber tabanlı TENG'ler için benzersiz triboelektrik malzemeler üretmek için inorganik nano kristalleri ve polimer nanofiberleri birleştirmenin umut verici, düşük maliyetli ve etkili bir yolunu sundu. Ayrıca, üretim kolaylığı ve

yüksek esneklik göz önüne alındığında, ağırlıkça %10 AgSbS₂@Naylon 6.6 nanofiber tabanlı TENG, giyilebilir ve taşınabilir uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir (Yar, 2021).

Okbaz ve arkadaşları 2022'de yaptıkları çalışmada öncelikle silikon malzemenin kalınlığını optimize edildi ve daha sonra Al ve Ti iletken malzemelerini ayrı ayrı silikon içerisine katkılarak silikon ve cam elyaf bazlı dikey temas ayırma modlu triboelektrik nanojeneratörün (TENG) elektrik üretim kapasitesini geliştirildi. Ağırlıkça %2,5 Al veya %5 Ti katkılandırılma yapılmıştır ve saf silikon tribonegatif katmanla karşılaştırıldığında, çıkış gücü yoğunluğunu sırasıyla 2,19 kat ve 2,06 kat artırdığını ifade etmişlerdir. İletken dolguların kullanılmasının TENG'lerin güçlerini ve şarj kapasitelerini önemli ölçüde artırdıklarını gözlemlemişlerdir. (Okbaz, 2022).

Yar ve arkadaşlarının giyilebilir elektronik teknolojisi için 2022'de yaptığı bir çalışmada yüksek triboelektrik performansa sahip atık hareketten mekanik enerji hasadı için PVP/EC nanofiberleri ile PAN/karbon katkılı nanofiberleri birleştirmeye dayalı bir TENG üretildi ve test edildi. CNT@PAN nanofiberleri, iyi elektrik iletkenlikleri nedeniyle TENG'lerin çıkış performansını önemli ölçüde iyileştirdi. Üretim kolaylığı ve yüksek esneklik göz önüne alındığında, bu çalışma giyilebilir elektronik ve kendi kendine çalışan sistemler gibi sayısız uygulama için yeni fırsatlar sundu (Kınas, 2022).

Shi ve arkadaşlarının 2022'de yaptığı bir çalışmada yüzey yük yoğunluğunun, tribomalzemelerin dielektrik özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, tipik bir tribomalzeme (yani, BaTiO₃/PVDF-TrFE nanokompozit) üzerindeki temas elektrifikasyonunu ve şarj dinamiklerini araştırmışlardır. Makro ölçekte triboelektrik cihazın karakterizasyonu ile birleştirildiğinde, transfer edilen cihaz sayısının elektronlar temas kuvvetinin yüzey alanına oranı ile artar ve artan sürtünme döngüleri altında doygunluğa ulaşma eğiliminde olduğunu ifade etmişlerdir. Birleştirilmiş yüksek geçirgenlik BaTiO₃ nanoparçacıkları, nanokompozitlerin kapasitansını ve elektron yakalama kapasitesini verimli bir şekilde artırdığı sonucuna varıldı. Yüksek BaTiO₃ yüklemelerinde, daha fazla elektronlar yığına sürüklenebilir ve arka elektrotta indüklenen yüklerle birleşerek büyük bir kaçak akım oluşturabilir ve buna göre elektron yayılımı hızlanmaktadır. Bu nedenle, yük yakalama kapasitesinin depolamaya oranı ve dağılıma ile yük çekici özellikler, yüksek performanslı tribomalzemelerin tasarımında kapsamlı olarak düşünülmeye yol açmıştır (Shi, 2022).

Günümüz dünyasında elektronik cihazların kullanım alanları çeşitlenmiştir. Yaygın olarak kullanılan ve daha fazla güç tüketen cihazlar giderek artmıştır, örneğin MEMS sensörleri ve aktüatörleri olarak piyasaya sunulmaktadır. Her boyutta üretimi kolay ve masrafsız olan TENG'lerin entegrasyonu daha faydalı ürünler ortaya çıkarmaktadır.

2.1. Triboelektrik Nanojeneratörlerin Temel Esasları

Nanojeneratör için akım, Maxwell'in yer değiştirme akımının önemli bir parçası olan yüzey polarizasyon yükleri tarafından indüklenen ve değişen polarizasyon alanıyla üretilir. Maxwell denklemleri;

$$\nabla \times D = P \quad (2.1)$$

$$\nabla \times D = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.4)$$

Yukarıda verilen denklemler Maxwell denklemlerini oluşturan manyetizma için Gauss Yasası, Faraday Endüksiyon Yasası ve Ampere Yasası sırasıyla verilmiş olup bu denklemlerde elektrik yer değiştirme alanı D, manyetik alanı B, elektrik alan şiddeti E, mıknatıslanma alanı H, serbest elektrik yükü yoğunluğu P, serbest akım yoğunluğu J, zaman t, diverjans operatörü ∇ ; rotasyonel operatörü ise $\nabla \times H$ şeklinde ifade edilmiştir. Elektromanyetik jeneratörlerin çıktı akımlarının, manyetik alanın zamana göre değişiminden elde edilip $\partial B/\partial t$ ile yakından ilişkilidir. Triboelektrik ve piezoelektrik nanojeneratörlerin akımları ise Maxwell yer değiştirme akımları denklemleriyle ilişkilidir. Bu ifade de aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.5)$$

Burada, ε_0 vakum elektrik geçirgenlik katsayısı ve P polarizasyon alanıdır. Bununla birlikte, piezoelektrik malzeme veya triboelektrik malzemeler gibi yüzey polarizasyon yüklerinin bulunduğu bir ortamda, yüzey elektrostatik yüklerinin polarizasyon yoğunluğundan yer değiştirme akımına katkısı göz ardı edilemez. Yer değiştirme akımı yukarıda verilen eşitlikten yola çıkarak zamana göre türevi alındığında ifade aşağıdaki gibidir:

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.6)$$

Denklemden yer değiştirme akımı J_D olarak verilmiştir. Yer değiştirme akımı izotropik ortamlar için, şu şekilde yazılabilir:

$$J_D = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.7)$$

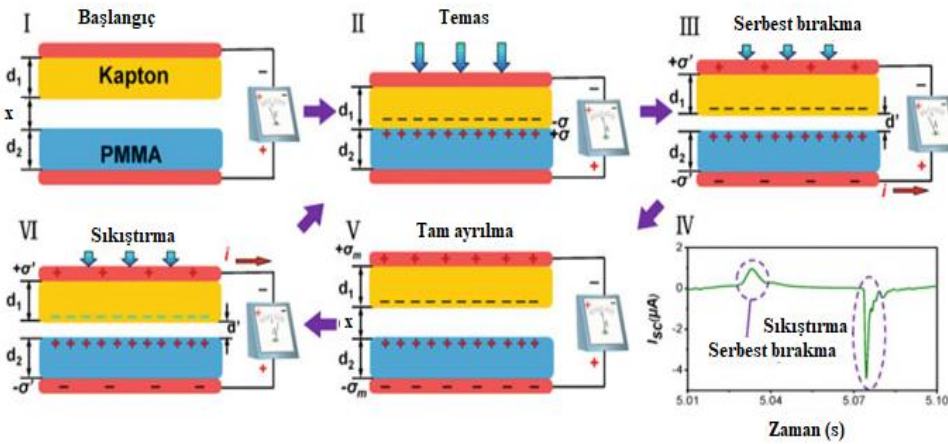
Yukarıda verilen denklemde dielektrik malzemenin elektrik geçirgenliği ϵ ile ifade edilmektedir. Yüzey polarize yükleri varsa, yer değiştirme akımı aşağıdaki gibidir (Pu, 2018).

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial P_s}{\partial t} \quad (2.8)$$

Burada birinci terim, değişen elektrik alanı tarafından indüklenen akımdır ve ikinci terim, yüzey elektrostatik yüklerinin polarizasyon alanının neden olduğu akımdır. İkinci terim, nanojeneratörlerin teorik kökenidir. Başka bir deyişle, nanojeneratörler, enerji ve sensörlerde yer değiştirme akımı uygulamalarıdır. Nano jeneratör ailesinde, piezoelektrik nano jeneratör (PENG), elektronları harici devreden akmaya yönlendirmek için piezoelektrik polarizasyon yüklerini ve üretilen zamanla değişen elektrik alanını uygular.

2.2. TENG'lerin Çalışma Prensibi

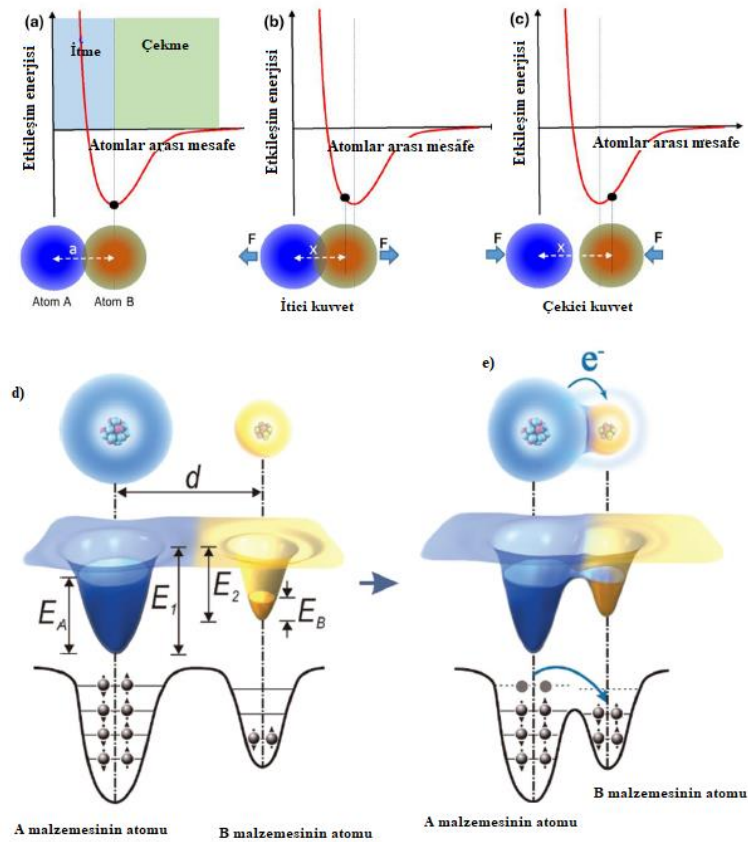
Şekil 2.1'de dikey temas-ayrılma modlu bir TENG'in şematik gösterimi ve elektriksel güç üretme basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Dikey-temas ayrılma modlu TENG çalışma prensibi (Wang, 2013)

Başlangıç basamağında malzemelerin bir birlerine teması söz konusu değildir. Yer alan iki katmanda da bir elektriksel güç yüklenmesi oluşmamıştır. (Şekil 2.1.I). Ancak bir dış kuvvet uygulanması ile farklı elektron alıp-verme eğilimine sahip dielektrik malzemeler bir birlerine temas ettirilmeye başlandığında malzemelerin yüzeylerinde zıt kutuplu elektrostatik yüklenme meydana gelir (Şekil 2.1, II). Malzemeler bir dış kuvvet etkisi ile temas ederken katmanlar arasında yerel bir bağıl hareket oluşur bundan dolayı bir sürtünme kuvveti meydana gelir. Bu

etkiyle birlikte elektron verme eğilimi olan malzeme yüzeyi pozitif (burada PMMA), elektron alma eğilimi olan malzeme negatif (burada KAPTON) yükle yüklenir. TENG in üzerindeki dış kuvvet kaldırıldığı zaman malzeme yüzeyleri esneme nedeniyle (veya geri çekici bir kuvvetle çekildiğinde) bir birlerinden ayrılır ve uzaklaşır (Şekil 2.1, III). Bu basamakta üstteki ve alttaki malzemelerin farklı yüklerle yüklenmiş olmasından kaynaklı olarak elektrotlarda elektrostatik indüksiyon etkisi ile potansiyel farkı oluşur. Kapalı devre konumunda elektrotları bağlayan iletken akım geçmeye başlar (Şekil 2.1, IV). Bir süre sonra iletken akım geçen elektronlar elektrotlardaki potansiyel farkını ortadan kaldırır, yük denkliliği sağlanır ve akım sonlanır (Şekil 2.1, V).



Şekil 2.2. İki atom arasındaki atomlar arası etkileşim potansiyeli ve ikisi arasındaki kuvvet, (a) denge konumunda, (b) itici bölgede güçlü elektron bulutu/dalga fonksiyonu çakışması ve (c) çekici bölgede elektron bulutu/dalga fonksiyonu zayıf etkileşimi. Genel malzemeler için, iyi tanımlanmış enerji bandı yapısına sahip olmayan iki malzeme arasında temas elektriklenmesi ve yük transferini açıklamak için önerilen bir elektron bulutu-potansiyel-kuyu modeli (Wang, 2013)

Tekrar harici bir kuvvetle dielektrikler bir birlerine yaklaştırdığında elektrotlardaki yük dengesi bozulmaya başlar ve elektronlar tersi yönde akmaya başlar dolayısıyla tekrar elektrik akımı oluşur. Bu basamakta elektron akışı sürdükçe potansiyel farkı azalır, dielektriklerin bir birlerine yaklaşması ise gerilim farkını artırıcı etki yaratır (Şekil 2.1, VI). Dielektrikler bir birlerine tam olarak tekrar temas ettiklerinde ve elektrotlar arasındaki gerilim farkı ortadan kalktığında tekrar

yük dengesi sağlanır, elektron akışı durur ve akım sıfırlanır (Şekil 2.1, I). Bu şekilde periyodik olarak tekrarlanan hareketler neticesinde bir alternatif akım oluşur (Fan, 2012; Wang, 2013). Oluşan bu alternatif akımı elektronik cihazlara elektriksel güç sağlamak amacıyla doğru akıma dönüştürmek için güç yönetim devreleri, köprü diyotu veya kapasitörler kullanılmaktadır.

Farklı malzemeler arasında temas elektriklenmesini Zhong Lin Wang elektron bulutu potansiyel kuyusu modeli adını verdiği bir modelle açıklamaktadır (Wang, 2019; Xu, 2018). Burada elektron bulutları, belirli atomlar veya moleküller içinde uzamsal olarak sınırlandırılmış olan ve belirli atomik veya moleküler orbitalleri işgal eden elektronlar tarafından oluşturulmaktadır. Bir atom, dış kabuk elektronlarının gevşek bir şekilde bağlı olduğu ve atomun veya molekülün bir elektron bulutunu oluşturduğu potansiyel bir kuyu ile temsil edilebilir. Şekil 2.2-d’de gösterildiği gibi, d elektron bulutları arasındaki mesafedir ve E_A ve E_B sırasıyla, A ve B malzemelerinin atomlarındaki elektronların işgal edilmiş enerji seviyeleridir. E_1 ve E_2 , sırasıyla A ve B malzemeleri için elektronların yüzeylerden kaçması için gerekli potansiyel enerjilerdir. E_1 ve E_2 sırasıyla E_A ve E_B ’den daha büyüktür. İki malzemenin temasından önce, potansiyel kuyuların yerel yakalama etkisinden dolayı elektronlar transfer edilemez. Başka bir ifade ile malzemeler mevcut elektronlarını üzerlerinde tutar. A malzemesi B malzemesi ile temas ettiğinde, elektron bulutları üst üste gelir ve başlangıçtaki tek potansiyel kuyusu asimetrik çift kuyu potansiyeli haline gelir ve daha sonra elektron A malzemesinin atomundan B malzemesinin atomuna sıçrayabilir. A ve B malzemelerinin ayrılmasından sonra, sıcaklık çok yüksek değilse, B malzemesinde bulunan E_2 enerji bariyeri nedeniyle B malzemesine aktarılan elektronların çoğu tutulacaktır (Şekil 2.2- e). Bu nedenle, yüzey elektriklenmesi sonucu, A malzemesi pozitif B malzemesi ise negatif yüklerle yüklenmiş olur. Temas elektriklenmesindeki kilit faktörlerden biri, iki yüzeyin temas etmesi için uygulanması gereken dış kuvvettir. Elektron bulutlarında veya dalga fonksiyonunda bir tür örtüşme anlamına gelen bir bağ oluşturan iki atom arasında, bağ uzunluğu veya atomlar arası mesafe olarak adlandırılan bir denge mesafesi " a " kurulur. Atomlar arası mesafe x a ’dan daha kısaysa, elektron bulutlarının artan örtüşmesi nedeniyle iki atom birbirini itme eğilimindedir. Atomlar arasındaki itme ve çekim etkileşimleri, atomlar arası etkileşim potansiyelinden kolaylıkla anlaşılabilir. Şekil 2.2- b, atomlar arası etkileşimlerin genel temsilini göstermektedir. Uygulanan dış kuvvet atomlar arası mesafe olan x ’in a ’dan daha küçük olmasına, yani atomların neden olduğu itme kuvvetini yenip bir birlerine yeterince yaklaşmasına yetecek kadar malzeme üzerinde baskı yaratmalıdır. Çünkü atomlar arası mesafe a ’dan daha küçük olduğunda atomlar bir birlerine ittikleri bölgededir. Atomlar arası mesafe x ’den büyükse, elektron bulutlarının azaltılmış örtüşmesi nedeniyle iki atom birbirini çekme eğilimindedir ve neredeyse bağlarını koparır. İtici bölgede, yerel elektron bulutlarındaki artan örtüşme, bir malzemedan diğerine elektron geçişi ile sonuçlanır.

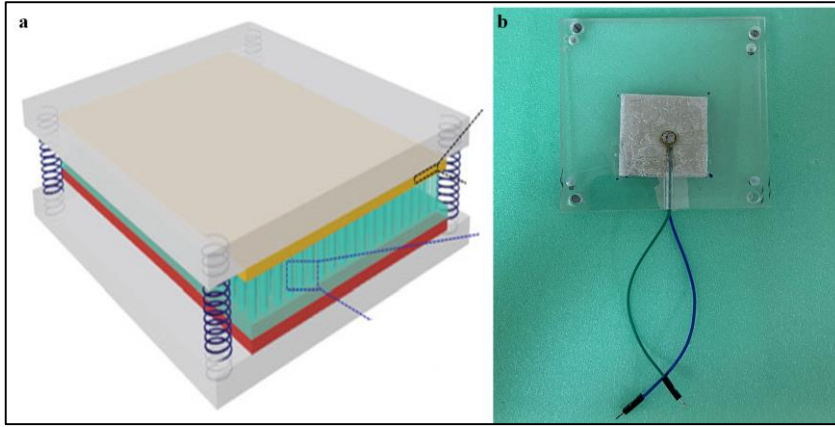
2.3. TENG ile Enerji Üretimi

TENG’ler triboelektriklenme ve elektrostatik indüksiyonun kombinasyonu ile mekanik hareketlerin elektriksel enerjiye dönüşmesini sağlayan nano-jeneratörlerdir. Bu durumda TENG’ler mekanik hareketin olduğu birçok ortamda elektrik enerjisi üretebilir.

İnsan vücudunun farklı uzuv hareketlerinden enerji hasatı yapan veya sensör amaçlı kullanılan farklı TENG yapılarının geliştirilip test edildiği birçok başarılı çalışma literatürde mevcuttur. Kafa ve boyun bölgeleri sınırlı miktarda hareket kabiliyetine sahip olmalarına rağmen, TENG'lerin en küçük ve düzensiz mekanik etkileri algılayıp elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyeti sayesinde kafa ve boyun için giyilebilir TENG'ler üretilmiştir. Göğüs ve bel bölgesi ise nefes alıp verme aktivitesi nedeniyle düzenli mekanik hareket kaynağıdır ve çeşitli tekstil yapılarındaki TENG'ler bu enerjiyi üretmek, göğüs ve bel bölgelerine yönelik önerilmiştir. İnsan kolu vücudun yüksek frekanslı ve genlikli ve aynı zamanda zorlu hareketleri yapabildiği bir bölgedir. Bu bölgeye yerleştirilen çeşitli TENG'ler ile görece yüksek miktarda mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Parmak, bilek, dirsek ve bacak hareketleri giyilebilir elektronik cihazlar için uygun mekanik enerjiyi barındırmasından dolayı bu bölgeler içinde çeşitli formlarda tasarlanmış esnek TENG çeşitleri mevcuttur. Ayrıca, benzersiz çalışma prensibi ve kimyasal olarak etkisiz olması, biyolojik olarak uyumlu ve hatta biyolojik olarak parçalanabilen polimer malzemelerin kullanımı sayesinde, TENG'nin nabız dalgasını ölçmek ve canlı vücudundan yapılan deneylerde insan kardiyovasküler sisteminden gelen küçük titreşimleri kullanabileceği de gösterilmiştir. Diğer enerji teknolojilerini kullanarak bu şekilde enerji üretimini gerçekleştirmek oldukça zordur. Bu nedenle alternatif kaynaklara yönelim söz konusudur. Buna nesnelere interneti örnek olarak verilebilir. Nesnelere İnterneti bilgi üretebilen ve bunu diğer nesnelere paylaşabilen mekanik ve dijital makineleri, bilgi işlem cihazlarını, hayvanları ve hatta insanları bir birine bağlar. Her nesne kendine özel özellikleri ile insan müdahalesine gerek olmaksızın birbirleriyle ve merkezi kontrol mekanizmaları ile veri alış verişi yapabilir. Nesnelere interneti, sağlık izleme, tıbbi bakım, çevre koruma, altyapı izleme ve güvenlik hizmetleri için geniş çapta dağıtılmış sensörlere ihtiyaç duyar. Dağıtılmış her bir sensör tek başına az güç tüketse de milyarlarca ve trilyonlarca sensörün toplam güç tüketimi ciddi boyutlara ulaşabilir. Elektronik cihazların güç ihtiyacını karşılamak için kullanılan bataryaların tüm bu sensörleri besleyebilmesi çeşitli nedenlerden dolayı mümkün görünmemektedir. Bataryaların üretiminde kullanılan zehirli kimyasallar canlı vücuduna ve çevreye zarar verebilir. Kullanım ömürleri ve şarj süreleri kısıtlı olan ve çok fazla sayıda sensöre takılan bataryaların sürekli bakımı ve değiştirilmesi ciddi çalışma zorluğu ve maliyet yaratır. Bulunduğu çevreden kendi elektrik enerjisini üretebilen cihazlar sayesinde nesnelere internetini oluşturan sensörler sürdürülebilir şekilde çalışabilir. Bu durum kendi kendine güç sağlayan sistemler geliştirmek için önemli bir neden ve motivasyon sunmaktadır. Bu noktada TENG'ler önemli bir boşluğu dolduracak nitelikte elektrik üretebilen cihazlar olarak karşımıza çıkıyor.

Dünya yüzeyinin büyük kısmını kaplayan okyanuslarda yaygın olarak dağılmış durumda olan dalga enerjisi bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak enerji ihtiyacımızın önemli bir kısmını karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Ancak günümüzde dalga enerjisinden elektrik üretmek amacıyla elektromanyetik jeneratörlere bağımlıyız. Elektro manyetik jeneratörler düşük frekanslı (<5 Hz), düzensiz hareketli dalga enerjisinin hasatında bazı dezavantajlara sahiptir. Elektro manyetik jeneratörlerde kullanılan kalıcı mıknatıslar ağır olduklarından okyanus enerjisinden elektriksel güç elde etmek için kullanılan jeneratörlerin ağır ve maliyetli olmasına neden olmaktadır. Elektro manyetik jeneratörlerin ağır mıknatıslar, karmaşık hidrolik ve mekanik bileşenlerinden dolayı ağırlıklarının artması okyanus üzerinde yüzmeyi zorlaştırdığı gibi yüksek ataletlerinden dolayı dalga hareketlerine karşı duyarlılığı azaltmakta, enerji hasat yapılabilecek dalga büyüklüğünü de artırmaktadır. Bu zorluklar nedeniyle mevcut teknolojiler genel olarak düşük enerji dönüşüm verimliliği ve yüksek maliyetleri ile daha çok prototip aşamasındadır ve dünyada ticari olarak kurulmuş büyük ölçekli dalga enerjisinden elektrik üreten bir tesis

bulunmamaktadır. Günümüzde geliştirilen triboelektrik nanojeneratörlerin ise düşük frekanslı hareketlerden elektrik üretmede elektro manyetik jeneratörlere göre bariz avantajları vardır. Elektro manyetik jeneratörlerin gücü, çalışma frekansının karesiyle orantılıyken, TENG'lerin çıkış güçleri, çalışma frekansının kendisiyle orantılıdır. Bu durum, bir elektro manyetik jeneratörün açık devre voltajının çalışma frekansı ile orantılı olmasına, ancak bir TENG'ninkinin çeşitli frekanslarda sabit kalmasına bağlanabilir. Çıkışlarının farklı frekans bağımlılığı, TENG'nin belirli bir eşik frekansının altında daha iyi enerji toplama performansına sahip olabileceğini göstermektedir. TENG'ler ile dalga enerjisinden daha etkin şekilde yararlanmak ve çok daha büyük ölçekte güç üretebilmek amacıyla Wang ve ekibi tarafından 2012 yılında kilometrekarelerce alana yayılmış milyonlarca TENG'in yüzen kablolarla bir birlerine balık ağları gibi bağlanması şeklinde düşünülen TENG networkleri fikri ortaya atılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar göstermiştir ki TENG networkleri okyanusların mavi enerjisinden büyük ölçekte elektriksel güç üretmek için uygun bir yaklaşımdır. Bu nedenle birçok araştırmacı dört farklı TENG çalışma modunu kullanarak değişik yapısal formlarda TENG'ler imal edip düzensiz dalga enerjisinden elektriksel güç üretmede oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 2.3. a) TENG Modeli (Wang, 2013), b) bu çalışmada kullanılan dikey temas ayırma modu

2.4. TENG için Malzeme Seçiminin Önemi

TENG'ler çok farklı malzemelerden kolaylıkla üretilebilirler. Burada önemli olan bir birleri ile temas edecek malzemelerin farklı triboelektrik polaritelerde olmasıdır. Tribo elektrik polarite malzemenin elektron kazanma ve kaybetme eğilimini ifade eden bir özelliktir. Malzeme seçiminin TENG performansını belirlemede önemli bir parametre olması araştırmacıları yeni TENG malzemeleri üretmeye veya mevcut malzemelerin çeşitli proseslerle geliştirilmesine yönlendirmektedir. TENG'lerin birçok farklı alanda kullanılabilmesi uygun malzeme seçimi, mevcut malzemelerin çeşitli yöntemlerle triboelektrik özelliklerinin iyileştirilmesi veya yeni malzemelerin geliştirilmesi ile mümkündür.

Tablo 2.1. Triboelektrik seri ((Khalid, 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu , 2018)

| POZİTİF YÜK ALMAYA EĞİLİMLİ MALZEMELER (AŞAĞI DOĞRU EĞİLİM AZALİYOR) | NEGATİF YÜK ALMAYA EĞİLİMLİ MALZEMELER (AŞAĞI DOĞRU NEGATİF EĞİLİM ARTIYOR) |
|---|--|
| İnsan teni | Pamuk |
| Asbest | Çelik |
| Asetat | Odun |
| Cam | Amber |
| Mika | Balmumu |
| İnsan saçı | Sert kauçuk |
| Naylon | Nikel |
| Yün | Bakır |
| Kürk | Pirinç |
| Kurşun | Gümüş |
| İpek | Çelik |
| Alüminyum | Altın, platin |
| Kâğıt | Kükürt |
| Pamuk | Asetat, viskoz rayon |
| | Polimetilmetakrilat (PMMA) |
| | Polivinilalkol |
| | Polyester |
| | Stiren |
| | Orlon |
| | Akrilik |
| | Poliüretan |
| | Polietilen |
| | Polipropilen |
| | Poliimid (kapton) |
| | Polietilenteraftalat |
| | Polivinilklorür |
| | Silikon |
| | Teflon (politetrafloroetilen-PTFE) |
| | Silikon kauçuk |
| | Ebonit |

Tablo 2.1’de malzemelerin temas elektriklenmesi ile pozitif veya negatif yük alma eğilimlerini gösterir. Bu liste triboelektrik seri olarak bilinmektedir. İki malzeme triboelektrik seride birbirinden ne kadar uzaksa, temas halinde yüklenme o kadar şiddetli olur. Listede birbirine yakın yerleşmiş malzemelerin teması sonucu arasında çok az yüklenme meydana gelebilir veya hiç yüklenme olmaz (Miller, 2011). Literatürde farklı triboelektrik seri listeleri mevcuttur (Khalid, 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu, 2018). Yüzey elektriklenmesi tribo-elektrik seri tabloda bir birinden uzak malzemelerde en fazla olma eğilimindedir, ancak malzemenin mekanik özellikleri de yüzey elektriklenmesini dolaylı yoldan etkiler. Örneğin farklı kuvvetler altında malzemelerin temas yüzeylerinin elastik deformasyona uğrama miktarları farklıdır. Bu nedenle geometrik olarak aynı yüzey alanına sahip malzeme çiftlerinin fiziksel temas yüzeyleri farklı olabilir. Malzeme katmanları da fiziksel temas yüzeyini etkiler. Bu nedenle seri tabloda bir birlerine daha yakın olan malzemelerin daha uzak olan malzemelere göre daha yüksek performans sergileme olasılığı da vardır. Malzeme üretimindeki temel hedef mevcut dielektrik malzemeye bir takım özelliklerin kazandırılmasıdır.

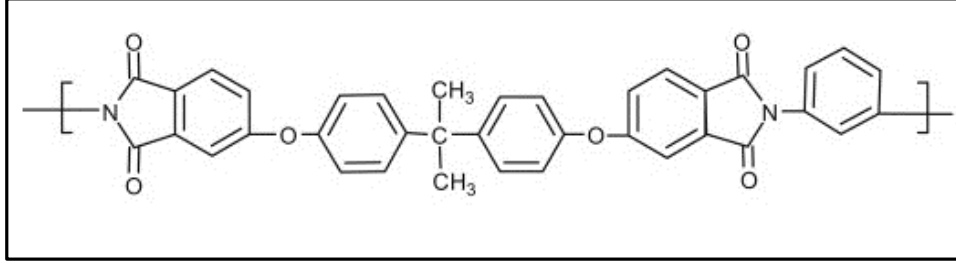
- Etkin temas alanını malzeme ile iyileştirmek için yüzey pürüzlülüğünün artırılması
- Elektron alma eğiliminin artırılarak yüzey yük yoğunluğunun artırılması
- Dielektrik sabitinin artırılarak elektrostatik indüksiyon miktarının artırılması
- Yüzeyde oluşan yüklerin malzemenin yüzeye yakın iç bölgelere aktarılmasını sağlayarak çalışma esnasında yüzey yüklerinin ortamdaki havada bulunan iyonlarla kombinasyonunu engellemek. Aksi takdirde yüzey yük yoğunluğu azalacak ve TENG performansı düşecektir.

Yüzey yükleri tarafından oluşturulan elektrostatik indüksiyon, TENG devresindeki elektrik akımının itici etkisidir. Bu nedenle, yüzey yük yoğunluğunu artırmak, TENG performansını iyileştirmenin kritik bir yoludur. Bununla birlikte, yüzey ücretleri çeşitli nedenlerle zamanla ortadan kalkabilir. Atmosferdeki farklı iyonlar veya parçacıklar arasındaki etkileşimler ve dielektrik yüzeylerdeki yükler nedeniyle yüzey yük yoğunluğu azaltılabilir. Dielektrik malzemeler yalıtkan olmalarına rağmen, elektronlar dielektrik malzeme boyunca hareket edebilir ve yüksek elektron konsantrasyonu nedeniyle elektrotlar üzerinde indüklenen pozitif yüklerle yeniden birleşebilir. Triboelektrik malzeme içinde oluşturdukları iletken kanallar, yüzey elektrifikasyonu sırasında triboelektrik malzeme ara yüzeyinde toplanan elektronların iç bölgelere akmasını sağlar. Elektronlar, sürtünme katmanlarının ara yüzünden ziyade negatif sürtünme katmanının iç bölgelerinde depolanır. Bu sayede tribopozitif malzemedeki daha fazla elektronun tribonegatif malzemeye geçmesine izin verilirken, havadaki iyonlar veya partiküller ile iç bölgelere taşınan elektronların rekombinasyonu engellenir. Sonuç olarak hem yüzey yük yoğunlukları artar hem de yüzey yüklerinin kaybı önlenir. Ancak iletken dolgu miktarının artması ile dielektrik malzemeye eklendiğinde, iletken kanal uzunluğu kademeli olarak artabilir. Bu nedenle elektrotlarda indüklenen pozitif yükler ve dielektrik malzemedeki negatif yükler yeniden birleştirilebilir (Okbaz, 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

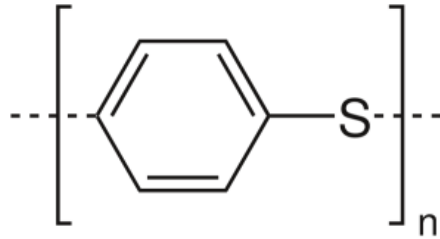
Bu çalışma kapsamında PEI, PPS, PEEK, PI ve GP ticari olarak Technical Fibre Products (TFB) şirketinden alınmıştır.

PEI; polieterimid veya PEI malzeme, yüksek mekanik dayanım ve sertliğe sahip bir amorf termoplastiktir. Dolgusuz PEI termoplastik saydam ve sarı renkli olup olağanüstü mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Polieterimidler, geniş bir sıcaklık aralığında oldukça yüksek sünme direncine ve yüksek sürekli çalışma sıcaklığına sahiptir. Dahası, boyutsal kararlılık ile birlikte çok iyi hidroliz direnci, polieterimid portföyünün özelliklerini tamamlar.



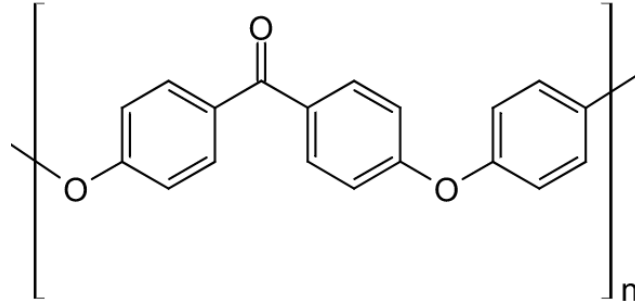
Şekil 3.1. PEI'nin kimyasal yapısı

PPS; Kimyada polifenilen sülfür olarak bilinir. PPS plastik, yarı kristal bir yüksek sıcaklık termoplastığıdır. Yapısından ötürü PPS, kimyasala çok dirençli bir polimer olup 200°C üzeri sıcaklıklarda dahi çok iyi mekanik dayanıma sahiptir. Düşük su emiliminin yanı sıra, PPS polimeri iyi boyutsal stabiliteye ve mükemmel elektriksel özelliklere sahiptir. PPS termoplastik, yüksek sıcaklıklarda bile kimyasal olarak oldukça kararlıdır. Piyasadaki PPS tedarikçileri, PPS GF40 (%40 cam elyaf takviyeli) gibi takviyeli PPS sınıflarında polifenilen sülfür reçine sunar. Yarı mamul açısından dolgusuz tipten özel sınıflara kadar farklı modifikasyonlar mevcuttur.



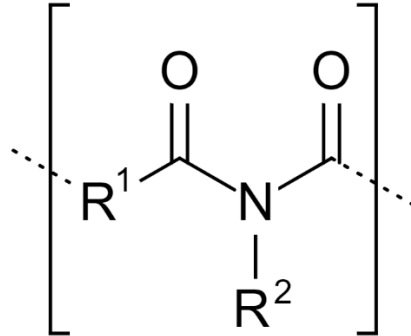
Şekil 3.2. PPS'nin kimyasal yapısı

PEEK; kimyada polietereterketon olarak bilinir. PEEK, mükemmel kimyasal uyumluluk sunan eşsiz bir yarı kristal mühendislik termoplastığıdır. Yüksek sıcaklık plastiği PEEK polimerinden üretilen parçalar aynı zamanda 260°C'ye kadar (480°F) sıcaklıklarda çalışabilir ve erime noktası 341°C (646°F) civarındadır. PEEK plastik genellikle sıcak su veya buhar ortamlarında kullanılmakta olup esneme ve çekme dayanımı gibi fiziksel özelliklerini büyük ölçüde korur. Polietereterketon genellikle yüksek fiyat eğilimindeki mühendislik termoplastiklerinden biri olarak görülür ancak deneyimli kullanıcılar, PEEK malzemelerin daha hafif, daha güçlü ve zorlu ortamlarda daha uzun süre dayanan parçalar üretme imkanı sağlayarak getirdiği katma değerini farkına varmıştır.



Şekil 3.3. PEEK'in kimyasal yapısı

PI; kimyada Poliimidler olarak bilinir. PI plastik, erimeyen bir yüksek sıcaklık polimeridir. Dayanımı, boyutsal kararlılığı ve sünme direnci 260°C üstü sıcaklıklarda bile yüksek seviyede kalır. Yağlanmamış koşullarda çalışabilme özelliği ve yüksek pV oranlarıyla bir araya gelen düşük aşınma oranları, bu ürünü zorlu sürtünme ve aşınma uygulamaları için ideal malzeme haline getirerek ömrü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır. Bu ürünün yüksek saflık seviyesi ve düşük gaz çıkışına vakum, uzay ve yarı iletken endüstrisinde ihtiyaç duyulur.

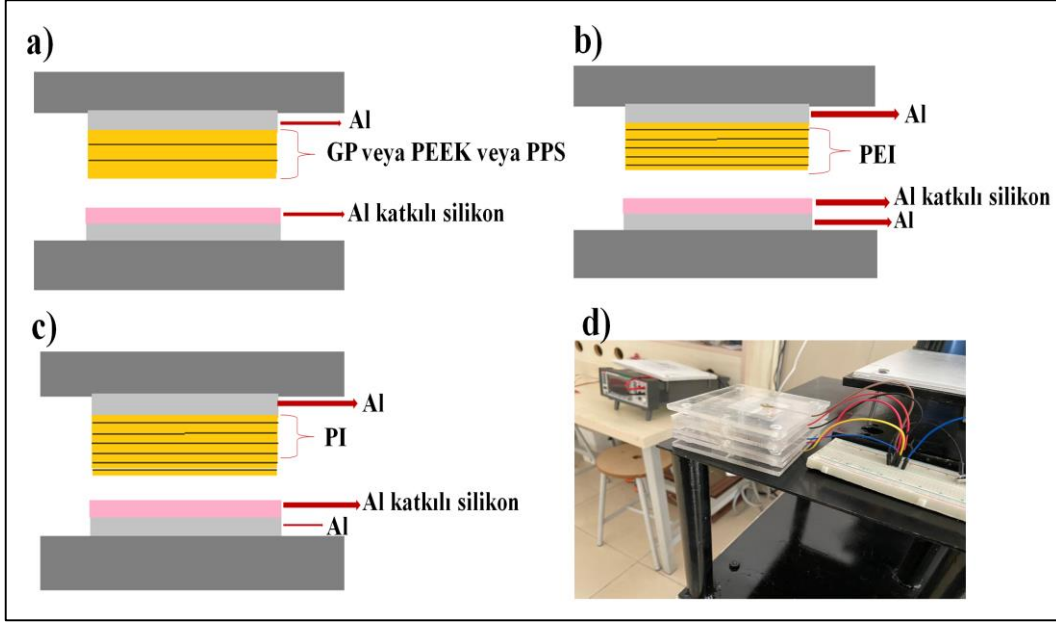


Şekil 3.4. PI'nın kimyasal yapısı

3.1. TENG Cihazının Üretimi

Dış katmanlar olarak 2 adet 10×10 cm² boyutunda pleksiglas malzeme kullanıldı. Alt ve üst katmanlarda matkap yardımı ile toplamda 8 adet mil delikleri açıldı. Bu mil deliklerinin yanına toplamda 8 adet yay deliği açıldı. Bu deliklere miller ve yay yerleştirildi. Tüm bu aşamalardan sonra matkap yardımı ile pleksiglas ve malzemenin üstüne 5 cm uzunluğunda yuvalar açıldı. Bu yuvalara elektrot ve kablolar yerleştirildi. İletken katman ile teması için lehim yardımı ile sabitlendi. Son olarak bir pleksiglasın üstüne yapıştırılan alüminyum folyoların üstüne %2,5 oranında Alüminyum ve 0,85 mm katmanda silikon malzeme kullanıldı. Diğer pleksiglasın üzerine yapıştırılan alüminyum folyoların üstüne ticari olarak aldığımız termoplastik keçeler (PEEK, PEI, PPS, PI ve GP) yapıştırıldı. Mekanik mukavemeti arttırmak ve sabit katman elde etmek için nano liflere termal basınç uygulandı.

Elde edilen elektriksel çıktı performanslarına daha iyi anlamak için farklı katmanlarda ve çok katmanlı TENG'ler hazırlandı. Ticari olarak alınan termoplastik keçeler malzemelerinin her biri için Şekil 3.5'de görüldüğü gibi TENG'ler hazırlanıp ayrıca elektriksel çıktıları incelendi.



Şekil 3.5. PEEK, PEI, PPS, PI ve GP termoplastik keçeler için a-) 3 kat katman, b-) 6 kat kal, c-) 7 kat katman ve d-) çok hücreli TENG'lerin görüntüsü

3.2. Malzeme Karakterizasyonu

3.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu "Optik Kolon", "Numune Hücresi" ve "Görüntüleme Sistemi" olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında;

- ✓ Elektron tabancası, elektron demetinin kaynağıdır.
- ✓ Anot plaka, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı plakadır.
- ✓ Yoğunlaştırıcı Mercekler, numune yüzeyine düşürülmek üzere ince elektron demeti elde etmek için kullanılır.
- ✓ Objektif Merceği, ışın demetini numune üzerinde odaklamak için kullanılır.

- ✓ Apar türler ve bobinler, merceğe bağlı çeşitli çapta apar türler elektron demetinin numune yüzeyine düşürülmesini sağlar. Yüzeyin taraması için kullanılan tarama bobinleri bu bölümde yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır.

Numune hücresi kısmında; görüntülenmek istenen numunelerin konulacağı numune tablası yer alır. Numuneler bu tablaya yerleştirilip sabitlendikten sonra görüntüleme işlemi yapabilmek adına numune hücresindeki hava vakumlanır. Böylece vakum ortamında elektronların doğrudan hiçbir başka saptırıcı ya da yöne yönelmeden numune üzerine düşürme durumu sağlanmış olur.

Görüntüleme sisteminde; elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan detektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır. SEM ile sıvı olmayan ve sıvı özellik taşımayan her türlü iletken numune doğrudan incelenebilir.

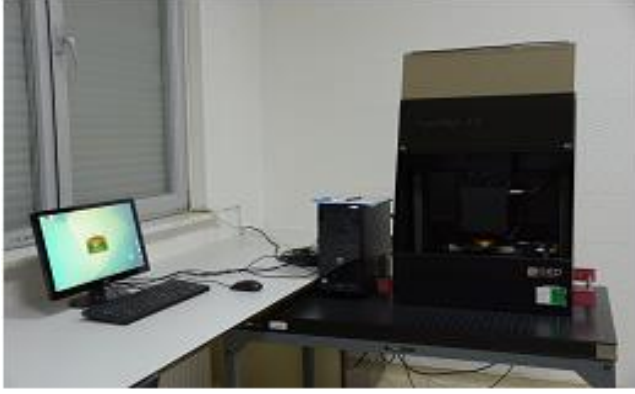


Şekil 3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

3.2.2. Optik Mikroskop ve Profilometre

Optik mikroskobu malzemede bulunan mikrometre ve daha küçük boyutlardaki yapıların incelenmesine olanak sağlar. Optik mikroskoplar, numunelerdeki küçük özellikleri büyütme için bir dizi cam merceğe (optik) kullanır. Temel optik mikroskop kurulumu, gözlemcinin gözüne yakın yerleştirilmiş bir merceğe (dolayısıyla göz merceğini çağırır) ve numune yüzeyine yakın yerleştirilmiş bir objektif merceğe oluşur. Bir ışık mikroskobu, dalga boyunun numunenin veya

ortamın dalga boyuna ve kırılma indisine bağlı olarak 390 ila 760 μm arasında değiştiği beyaz ışıkla donatılmıştır (yani, görünür aralık). 0,2 nm arasında değiştiği beyaz ışıkla donatılmıştır. Numune şeffafsı veya en azından yüksek ışık geçirgenliği sergiliyorsa, ışık numunenin içinden yansıtılır ve objektif lens tarafından göz merceğine toplanır. Bununla birlikte, numune yarı saydam veya opak ise, ışık yüzeyden bakan göz merceğine yansıtılır. Bu nedenle, optik mikroskop morfoloji, çok fazlı yapılar ve kırılma yüzeylerini gözlemlemek için çok kullanışlıdır. Optik mikroskobun polimer mekaniği için büyük önem taşıyan diğer varyasyonları mevcuttur. Örnek üzerinde istenilen bölge, hem optik hem de stylus profiller ile herhangi bir kayma olmaksızın bilgisayar kontrollü olarak görüntülenir. Yüzeye ışınların gönderilmesi veya yüzeyde gezdiren başka bir elemanın üzerine tutularak yansıyan ışınlardaki değişim ile yüzey pürüzlülüğünü ölçerek yüzey profili elde edilir. Malzeme yüzeyinin 2 ve 3 boyutlu haritası çıkarılır. Yüzeyle temas olmadığından numune üzerinde aşınma meydana gelmez. Bu cihazla yüzey pürüzlülük tarama, topografik tarama, haritalama, film kalınlığı ölçme, optik sabit belirleme testleri yapılmaktadır.



Şekil 3.7. Stylus Profilometre / NanoMap/LS Optik ve profilometre Mikroskop Cihazı

3.3. TENG'in Elektriksel Parametrelerinin Ölçümü

Temel olarak TENG elektriksel performansı direnç yükleri ve kapasitif yükler altında test edilir. TENG'ler sürekli güç kaynağı veya sensör olarak kullanılacaksa direnç yükleri altında, şarj cihazı olarak kullanılacaksa kapasitif yükler altında performansları test edilir. Temas ayrılma modunda çalışan TENG'ler yönü ve şiddeti periyodik olarak değişen alternatif akım üretir. Burada voltaj değerleri Rigol marka osiloskop (Şekil 3.8) kullanılarak ölçülecektir. Güç değeri ise;

$$P=I \times V \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplandı.

$$P = \frac{V^2}{R_{eq}} \quad (3.2)$$

burada V , TENG elektrotları arasındaki voltajdır. Dirençlerin seri bağlı durumdaki eşdeğer direnci (R_{eq}) aşağıdaki gibidir;

$$R_{eq} = R_{in} + R_S \quad (3.3)$$

Dirençler paralel bağlandığında, R_{eq} aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$R_{eq} = \frac{R_p R_{in}}{R_p + R_{in}} \quad (3.4)$$

Dirençler paralel bağlandığında ölçü aleti de devreye paralel bağlanır. Bu durumda ölçüm cihazından okunan voltaj değeri (V_m) TENG elektrotları arasındaki voltaja ($V_m = V$) eşittir. Ancak ölçü aleti devreye seri bağlandığında okunan değer ölçü aletinin iki ucu arasındaki gerilim değeridir. Bu durumda TENG elektrotları arasındaki voltaj değeri şu şekilde hesaplanır;

$$V = V_m + IR_{in} \quad (3.5)$$

burada, mevcut değer aşağıdaki gibi elde edilir;

$$I = \frac{V_m}{R_{in}} \quad (3.6)$$

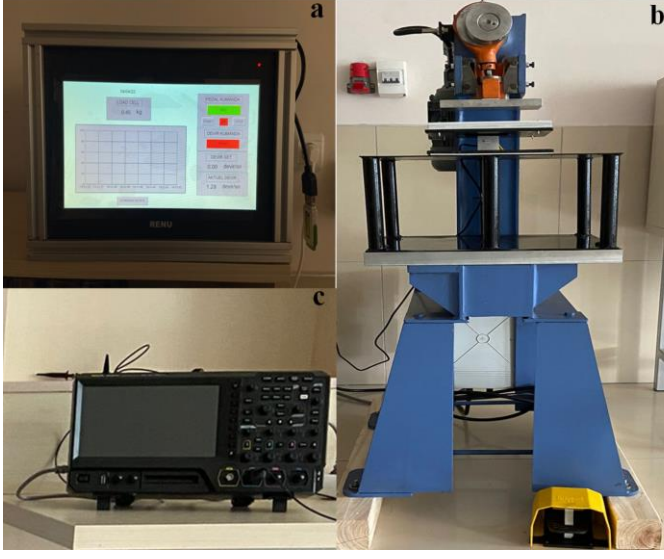
TENG'ler sürekli güç sağlayıcısı olmalarının yanında şarj cihazları olarak da kullanılabilir. Bu nedenle şarj performanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Farklı kapasitans değerlerine sahip kapasitörler TENG devresine bağlanarak şarj performansları test edilir ve optimum kapasitif yükleri belirlenir. Bu sayede hem uygun voltaj değeri, hem de depolanan enerji miktarı kontrol altına alınıp elektronik cihazlara uygun elektrik sağlanabilir. Bu amaçla farklı kapasitans değerine sahip kapasitörler devreye bağlanıp deneyler gerçekleştirildi. Kapasitörde depolanan yük miktarı;

$$Q_c = C \times V \quad (3.7)$$

bağıntısından, enerji miktarı ise;

$$E = 0,5 \times C \times V^2 \quad (3.8)$$

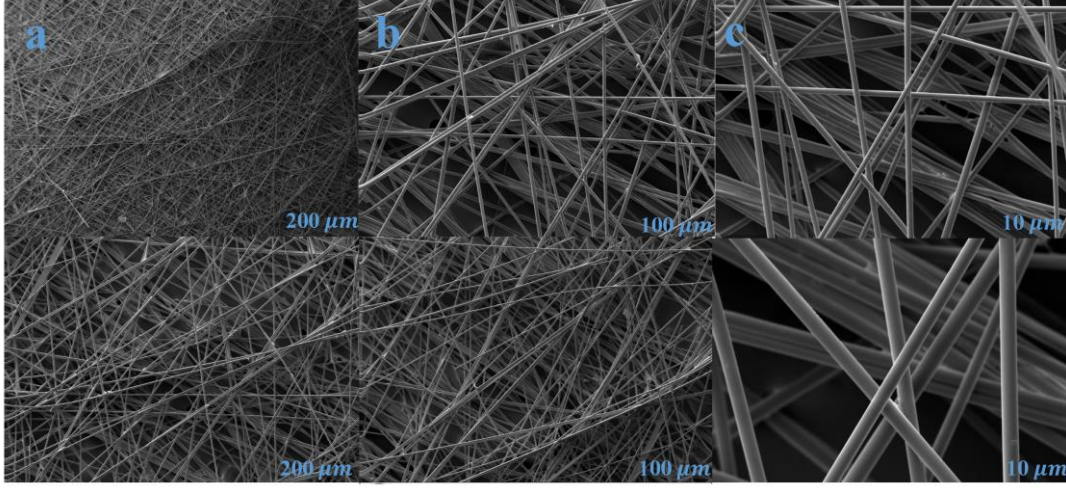
bağıntısından hesaplandı. Burada C kapasite değeridir, V ise ölçülen kapasitenin voltajıdır.



Şekil 3.8. Rigol marka osiloskop ve darbe sağlayıcı

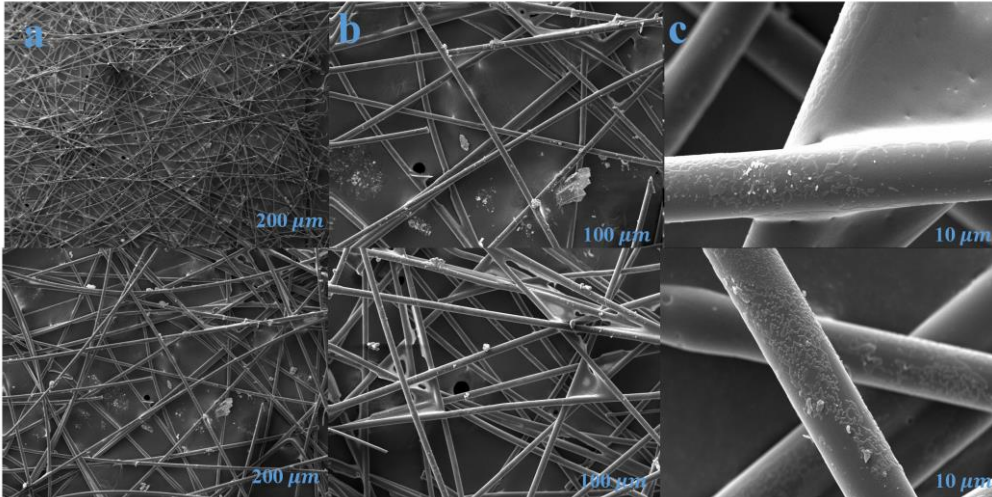
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri



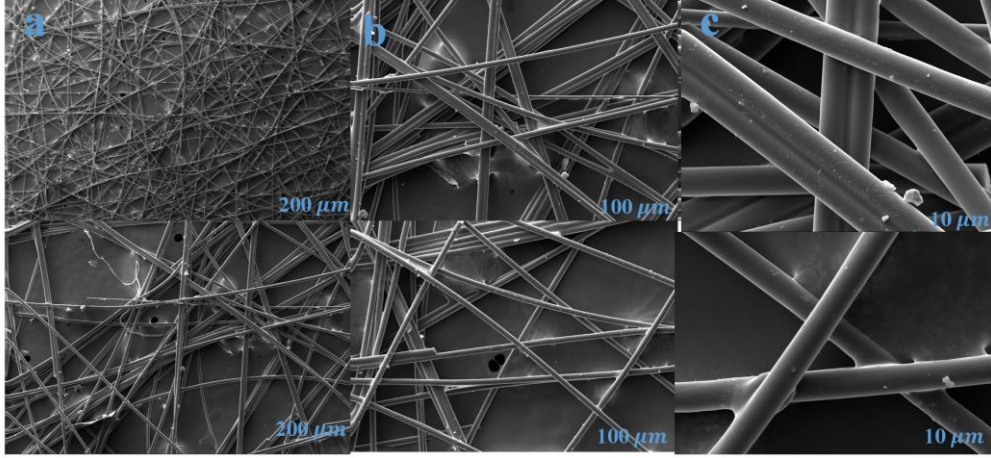
Şekil 4.1. GP termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri

GP termoplastik keçesi için lifler ve saf polimer çözeltisi arasındaki iyi bir etkileşimi gösterdiği ve birbirine girmiş sarmal bir şekilde olduğu anlaşılmaktadır. Image J programı ile yapılan ölçüme göre GP termoplastik keçe için ölçülen çap ortalaması 6 μm mikrometre olarak elde edilmiştir.



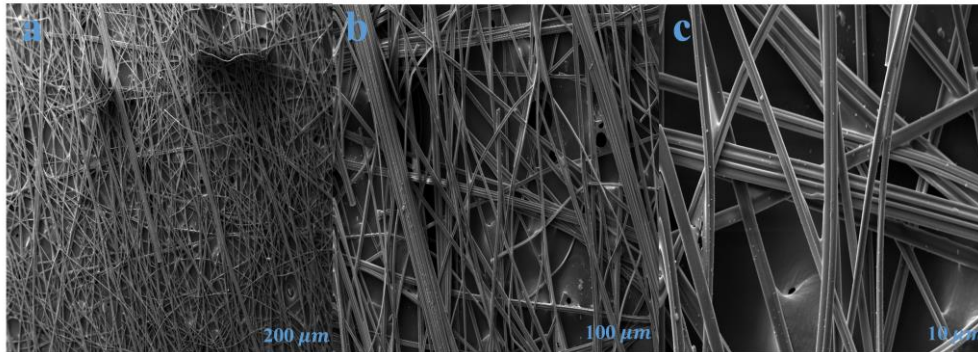
Şekil 4.2. PEEK termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 4.2'den yola çıkarak termoplastik keçesi için fiberimsi bir yapıda ve birbirine girmiş sarmal bir şekilde olduğu anlaşılmaktadır. Termoplastik lifler olarak kabul edilen PEEK lifleri, hem kimyasalların çok büyük bir çoğunluğuna hem de yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dayanıklıdır. Image J programı ile yapılan ölçüme göre PEEK termoplastik keçe için çap ortalaması 36 μm bulunmuştur.



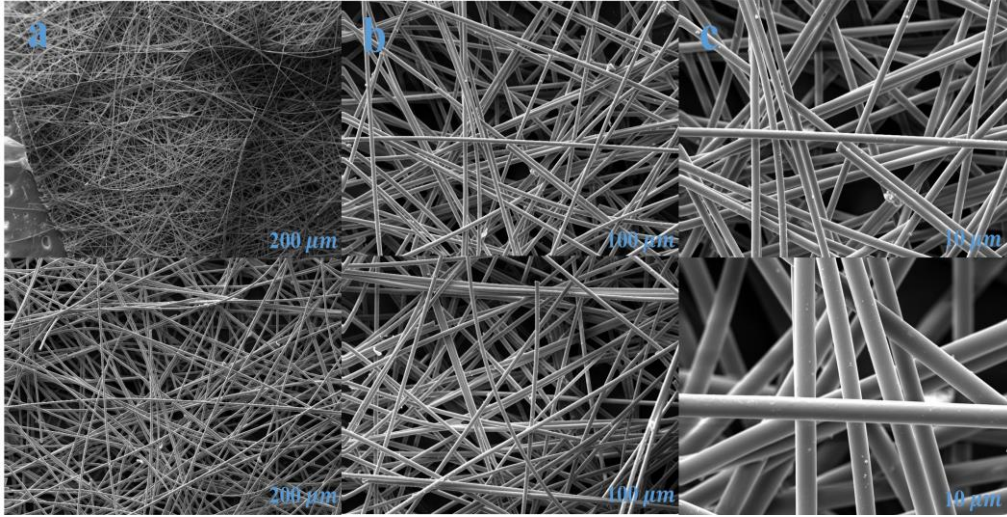
Şekil 4.3. PEI termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 4.3'den yola çıkarak PEI termoplastik keçesi için fiberimsi bir yapıda ve birbirine girmiş sarmal bir şekilde olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bu fiberlerin yüzeylerin pürüzlü olduğu görülmekte olup küresel gözeneklerde görülmektedir. Image J programı ile yapılan ölçüme göre PEI termoplastik keçe için çap ortalaması 14.6 μm bulunmuştur.



Şekil 4.4. PI termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 4.4'den yola çıkarak PI termoplastik keçesi için liflerin bazı yüzeyleri arasında boşluklar gözlenmekte olup sarmal bir yapı gözlemlenmiştir. Image J programı ile yapılan ölçüme göre PI termoplastik keçe için çap ortalaması 9 μm bulunmuştur.



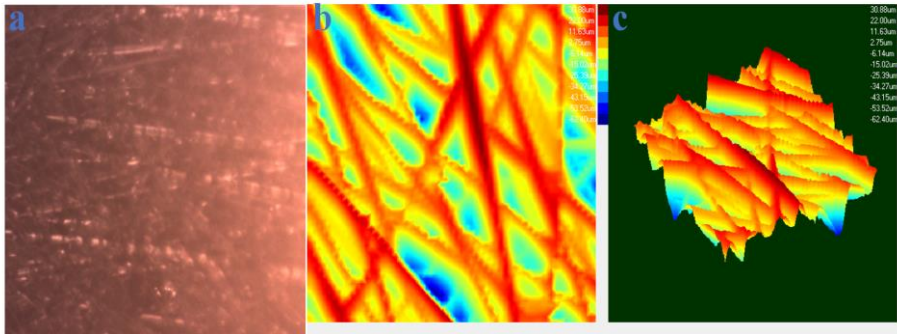
Şekil 4.5. PPS termoplastik keçe için taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 4.4'den yola çıkarak PPS termoplastik keçesi için lifli ve fiberimsi bir yapının olduğu ve liflerin bazı yüzeyleri arasında boşlukların gözlendiği sarmal bir yapısı olduğu söylenebilir. Image J programı ile yapılan ölçüme göre PPS termoplastik keçe için çap ortalaması 10 μm bulunmuştur.

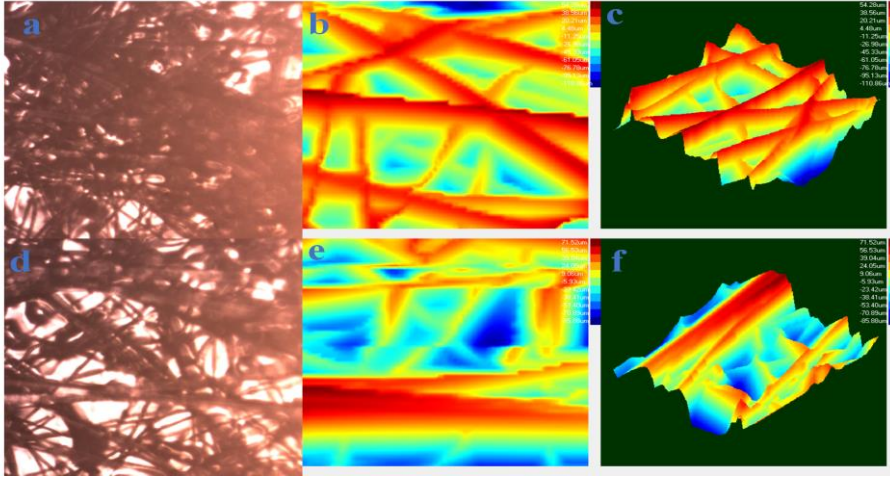
SEM yüzey morfolojisi sonuçlarından elde edilen görüntülerinin Image J programı ile analizleri sonucunda çap ortalamasının PEEK termoplastik keçe olduğu görülmüştür. Image J programı ile yapılan analizler sonucunda çap ortalamalarının yüksek olandan düşük olana doğru sırasıyla; PEEK, PEI, PI, PPS ve GP olarak elde edildi.

4.2. Optik Mikroskop ve Profilometre

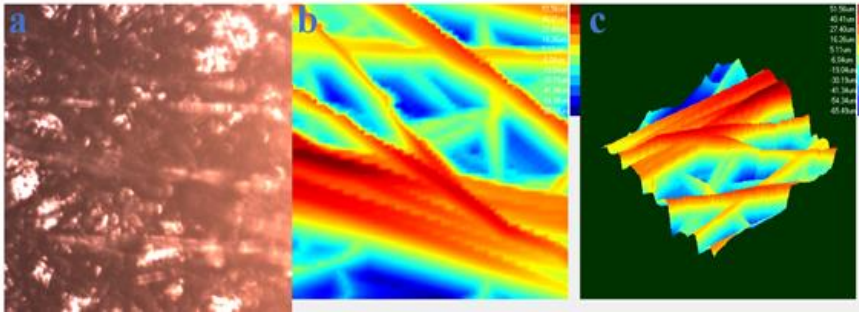
Termoplastik keçe için optik mikroskop ve profilometre sonuçları Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10'da verilmiştir. 2D ve 3D profilometre görüntülerinde, fiber, fiber yüzeyindeki oluşan gözenekler ve vadilerden elde edilen sonuçlardan yüzey pürüzlülüğü (Ra), Ortalama karekökü (RRMS) ve tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) gibi parametreler elde edilmiştir. Bu parametreler Tablo 4.1' de verilmiştir.



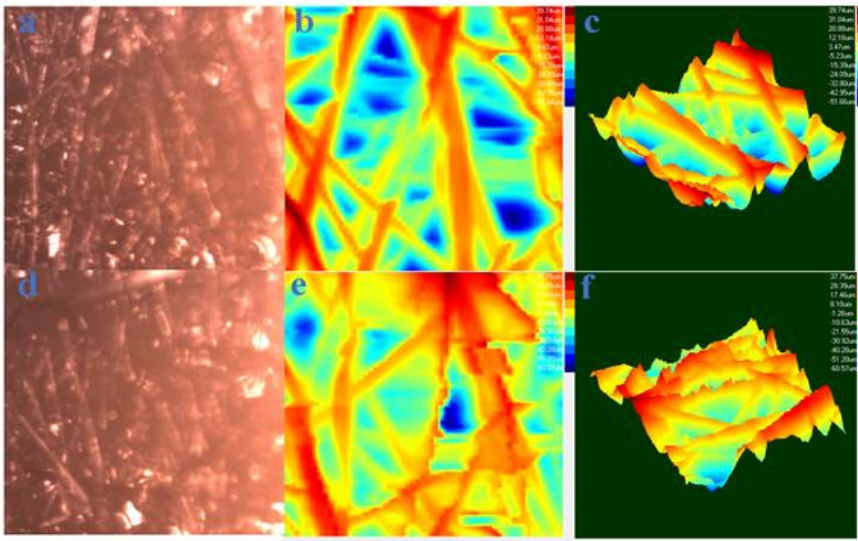
Şekil 4.6. GP termoplastik keçe için Optik ve Profilometre Mikroskop Görüntüleri



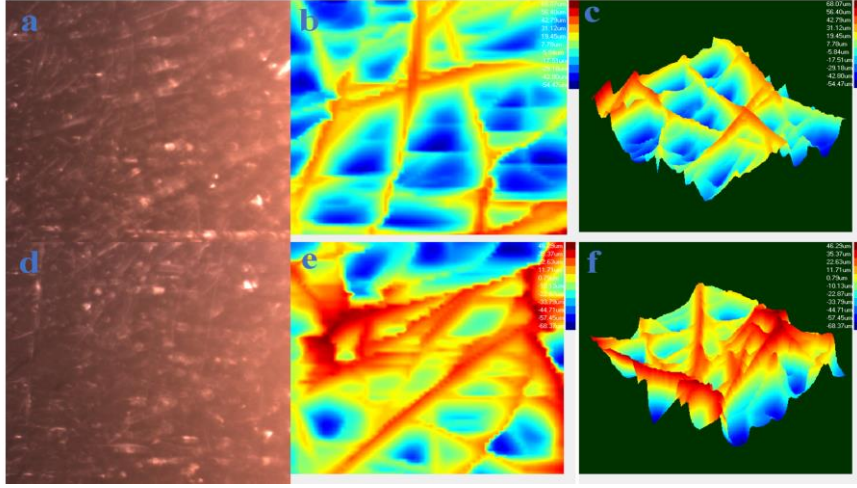
Şekil 4.7. PEEK termoplastik keçe için Optik ve Profilometre Mikroskop Görüntüleri



Şekil 4.8. PEI termoplastik keçe için Optik ve Profilometre Mikroskop Görüntüleri



Şekil 4.9. PI termoplastik keçe için Optik ve Profilometre Mikroskop Görüntüleri



Şekil 4.10. PPS termoplastik keçe için Optik ve Profilometre Mikroskop Görüntüleri

Tablo 4,1'deki verilerden yola çıkarak Yüzey pürüzlülüğü (Ra),Ortalama karekökü (RRMS) ve Tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) PEEK termoplastik için hepsinden yüksek çıktığı görülmüştür. Şekil 4.7'den de anlaşıldığı üzere PEEK termoplastik keçe yüzeyi oldukça yoğun renk konsantrasyonuna ve vadilere sahiptir. En düşük renk konsantrasyonuna ve vadilere sahip olan termoplastik keçe ise PI'dır. Yine tablo 4.1'deki verilerden yola çıkarak yüzey pürüzlülüğünün termoplastik keçeler arasında en düşük termoplastik keçenin PI olduğu söylenebilir. Termoplastik keçeler arasında Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için en yüksekten en düşük olana doğru bir sıralama yapılırsa sırasıyla; PEI, PEEK, PPS, GP ve PI olarak elde edilir. Ortalama karekökü (RRMS) için sıralama yapılırsa sırasıyla; PEEK, PEI, GP, PPS ve PI olarak elde edilir. Son olarak Tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) için bir sıralama yapılırsa sırasıyla; PEEK, GP, PPS, PEI ve PI olarak elde edilir.

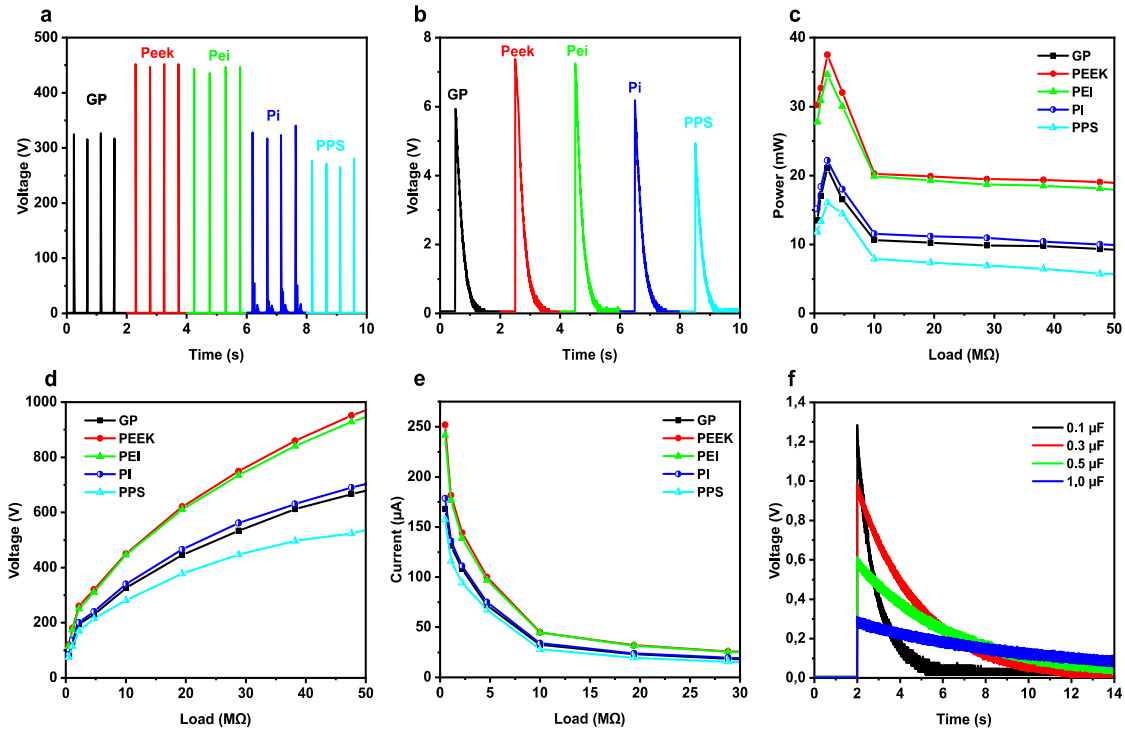
Tablo 4.1. GP, PEEK, PEI, PI, ve PPS termoplastik keçeler için yüzey pürüzlülüğü (Ra), Ortalama karekökü (RRMS) ve tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) değerleri

| | Yüzey pürüzlülüğü (Ra) | Ortalama karekökü (RRMS) | Tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) |
|------|------------------------|--------------------------|---|
| GP | 17.65 µm | 22.60 µm | 130.36 µm |
| PEEK | 21.04 µm | 25.87 µm | 165.14 µm |
| PEI | 21.34 µm | 25.25 µm | 117.04 µm |
| PI | 13.68 µm | 16.78 µm | 91.40 µm |
| PPS | 18.75 µm | 22.25 µm | 119.14 µm |

4.3. TENG'lerin Elektriksel Çıktı Performansları

Bir TENG'in performansını belirleyen baskın parametre kontak elektrifikasyonudur. Temaslı elektrifikasyon miktarının yoğunlaştırılması, TENG elektrik çıkışlarını artırır. Temaslı elektrifikasyon, farklı elektron afinitelerine sahip malzemeler temas ettiğinde meydana gelir. Bununla birlikte, kontak elektrifikasyonunun belirli sınırları vardır. Triboelektrik seride kullanılmak üzere seçilen malzemeler mümkün olduğunca birbirinden uzak olmalıdır ki yüzey yük yoğunluğu artsın. Ancak ne tür malzeme kullanılırsa kullanılsın, yüzey yük yoğunluğu belirli bir seviyeye ulaştığında, çeşitli nedenlerle malzemeler arasındaki yük alışverişi durur. Dielektrik malzemeler bozunma ile yüklerin uzun süre yüzeyde depolanmasına izin verir. Sonuç olarak, yüzey yük yoğunluğu uzun süre sabit kalabilir ve TENG, elektrostatik indüksiyon yoluyla elektrotlarda yük akışı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu yalıtkan özellik, yüzey yük yoğunluğunun çok ince bir triboelektrik malzeme bölgesinde doygunluğa ulaşmasına neden olur. Bu yalıtım özelliği, yüzey yük yoğunluğunun çok ince bir triboelektrik malzeme bölgesinde doygunluğa ulaşmasına neden olur (Lai, 2018). Yüzey ile iç bölgeler arasında iletken kanallar oluşturan gömülü iletken katkı maddeleri sayesinde triboelektrik malzemenin iç kısmında da net yüklü bölgelerin oluşması sağlayarak yüklerin daha uzun süre tutulmasına neden olur (Cui, 2016). Bu dâhili bölge şarjı, elektrostatik indüksiyona katkıda bulunarak TENG performansını da güçlendirir. Bu iletken kanallar kullanılarak yüklerin iç kısımlara aktarılması ile temas yüzeylerindeki yük yoğunluğunun doygunluğu bir miktar geciktirilir ve böylece triboelektrik malzemeler arasındaki yük alışverişi devam eder. Ayrıca iç bölgelere taşınan yüklerin özellikle havadaki iyonlarla etkileşimi engellenir. Böylece, triboelektrik malzemenin yük depolama veya yakalama kapasitesi, TENG performansına katkıda bulunarak artırılır.

Şekil 4.11'de farklı termoplastik keçe kullanımına göre TENG'lerin elektriksel çıkış performansları verilmiştir.



Şekil 4.11. 1 katmandaki farklı termoplastik keçelerin. a) anlık voltaj eğrileri, b) kapasitör voltaj eğrileri, c) çıkış güç eğrileri, d) farklı dirençler altında gerilim eğrileri, e) farklı dirençler altında akım eğrileri ve f) PEEK için farklı kapasitif yükler

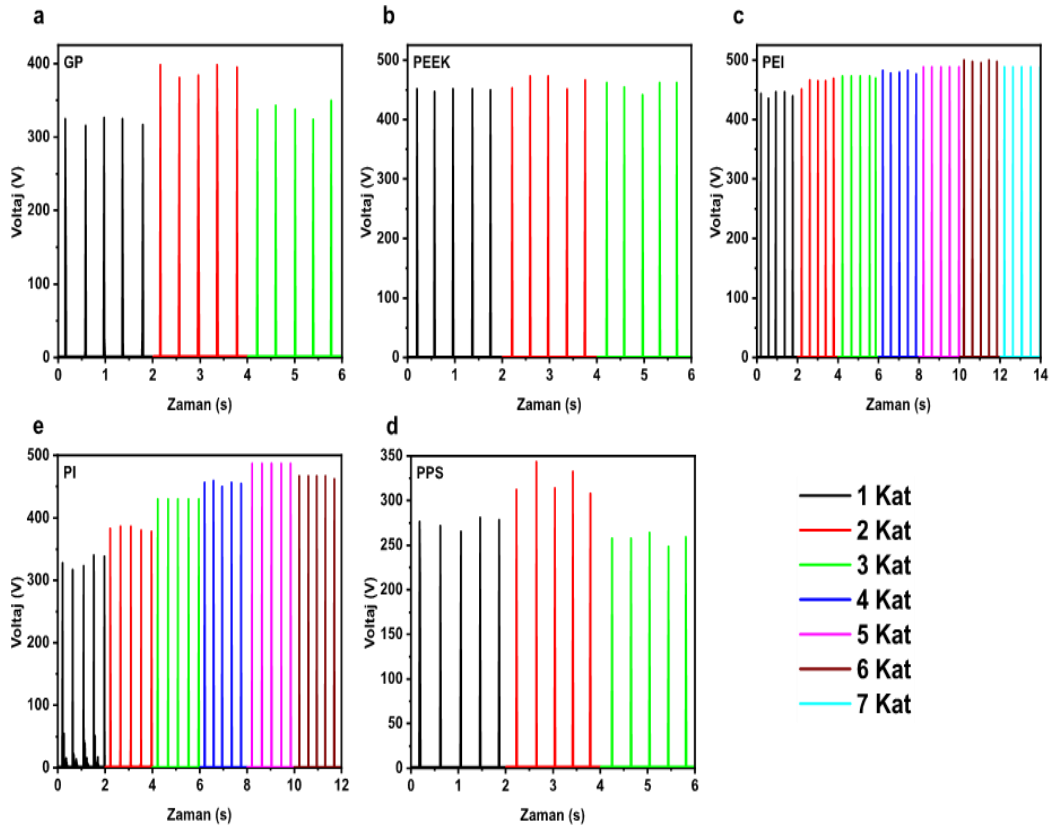
Şekil 4.11 (a)'de ağırlıkça %2,5 Al 0,85 mm kalınlığında silikon ve termoplastik keçe (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) ile yapılmış TENG'ler için çıkış voltajları gösterilmiştir. En yüksek çıkış voltajı PEEK termoplastik keçe malzemesi kullanılarak üretilen TENG'den elde edilmiştir. Çıkış voltajı 451 V olarak ölçülmüştür. Şekil 4.11 (b)'de bir darbeye karşılık gelen kapasitör şarj-deşarj eğrilerini gösterir. Kondansatörde depolanan yük miktarı $Q=C \times V$ ile hesaplanır. Hesaplamalar Tablo 4.2'de verilmiştir. Kondansatör voltajları çıkış voltajları ile uyumludur.

TENG modelinin çıkış gücü devreye bağlı yük direnci ile değişir. Pratik bir uygulamada TENG'nin güç kaynağı olarak kullanımını göstermek için devreye farklı yük dirençlerinin eklenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla devreye 1 M Ω ile 57 M Ω arasında değişen dirençler harici yük olarak bağlanmıştır. Ölçüm cihazının iç direnci 10 M Ω olduğundan dirençler $R_{eq} < 10$ M Ω için paralel, $R_{eq} > 10$ M Ω için seri olarak bağlanmıştır. Çıkış gücü önce artan yük direnciyle maksimum güç çıkışına kadar artar ardından tüm TENG modelleri için sürekli olarak azalır. Pratik uygulama açısından, bir TENG tarafından üretilen elektrik gücünün arttırılması en önemli amaçlardan biridir. Şekil 4.11 (c)'de Al katkılı silikon ve termoplastik keçelerden (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) yapılmış TENG'ler için farklı direnç değerleri için güç çıkışları verilmiştir. Tüm malzemeler için maksimum güç noktası 2,2 M Ω direnç bağlı iken elde edilmiştir. Farklı cihazlar çalışmak için farklı miktarlarda güce ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle farklı elektronik cihazlarda farklı kapasitif yükler kullanılır. Tüm termoplastik keçeler arasından en iyi güç çıkışına sahip olan PEEK için farklı kapasitif yükler kullanılarak şarj-deşarj ölçümleri yapılmıştır.

Tablo 4.2. 1 katmandaki farklı termoplastik keçelerin çıkış voltajları, kapasitör voltajları, çıkış güçleri, farklı dirençler altında gerilim değerleri ve farklı dirençler altında akım değerleri

| VOLTAJ | GP | PEEK | PEI | PI | PPS |
|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Volt (V) | 326 | 451 | 446 | 340 | 281 |
| Kap (V) | 5,9375 | 7,37 | 7,25 | 6,18 | 4,93 |
| Güç (mW) 2,2 M Ω | 21,08 | 37,48 | 34,65 | 22,18 | 16,02 |
| Output volt (V) (47,6 M Ω) | 666,4 | 952 | 928,2 | 690,2 | 523,6 |
| Akım (μ A) 0,5 M Ω | 168 | 252 | 241,5 | 178,5 | 157,5 |

Şekil 4.12'de gösterildiği üzere termoplastik keçelerin katman sayısı arttırılarak keçeler için katman optimizasyonu yapıldı. Termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'lere elle 20 N'luk bir kuvvet altında ve 2 Hz'lik bir frekans aralığında çıkış voltajları ölçüldü. Termoplastik keçelerin katman sayısındaki artış, TENG'lerin elektrik performansı üzerinde oldukça etkilidir.



Şekil 4.12. Farklı katmanlarda a) GP, b) PEEK, c) PEİ, d) PPS ve e) PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için voltaj- zaman grafikleri

Şekil 4.12'de ağırlıkça %2,5 Al 0,85 mm kalınlığında silikon ve farklı katmanlarda termoplastik keçe (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) ile yapılmış TENG'ler için çıkış voltajları gösterilmiştir. Her bir malzeme farklı kimyasal yapıya sahip olduğu için en iyi çıkış performansı farklı katmanlarda sergilemişlerdir. GP termoplastik keçe için 2 kat kalınlığında 398 V, PEEK termoplastik keçe için 2 kat kalınlığında 473 V, PEI termoplastik keçe için 6 kat kalınlığında 500 V, PI termoplastik keçe için 5 kat kalınlığında 487 V ve PPS termoplastik keçe 2 kat kalınlığında 343 V olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.3. Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçe kullanılarak üretilen TENG'ler için voltaj değerleri

| Voltaj (V) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| GP | 326 | 398 | 350 | | | | |
| PEEK | 451 | 473 | 426 | | | | |
| PEI | 446 | 469 | 473 | 482 | 489 | 500 | 489 |
| PI | 340 | 386 | 430 | 460 | 487 | 467 | |
| PPS | 281 | 343 | 264 | | | | |

Tablo 4.3'deki verilerden yola çıkarak GP termoplastik keçe için 2 kat katmanda en yüksek 398 V olarak elde edilmiş olup 3 kat katmanda voltaj azalmıştır. PEEK termoplastik keçe için 2 kat katmanda 473 V olarak elde edilmiş olup 3 kat katmanda voltaj azalması görülmüştür. PEI termoplastik keçe için en yüksek voltaj değerine sahip 6 kat katmanda 500 V olarak elde edilmiş olup 7 kat katmanda voltaj azalması gözlemlenmiştir. PI termoplastik keçe için en yüksek voltaj değeri 5 kat katmanda 487 V olarak elde edilmiş olup kat kalınlığı artırılınca voltaj değerinin azaldığı görülmüştür. PPS termoplastik keçe için en yüksek voltaj değerine sahip 2 kat katmanda 343 V olarak elde edilmiş olup kat kalınlığı artırılınca voltaj düşmesi gözlemlenmiştir. Kat katman ölçümleri sonucunda yüzey pürüzlülüğünün artırılması çıkış voltajlarının artmasına neden olduğu görülmüştür.

Voltaj (V), aktarılan yük miktarı (Q) ve iki elektrot arasındaki ayırma mesafesi (x) gibi üç parametre arasındaki ilişkiyi kullanan V–Q–x denklemi dikey temas ayırma modu TENG'nin gerçek zamanlı elektrik çıktılarını temsil eden en önemli teorik denklemdir. r mesafesindeki bir yükün neden olduğu voltaj, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$V = -\frac{Q}{S_{\varepsilon_0}} \left(\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\varepsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \quad (4.1)$$

Açık devre durumunda elektrotlar arasındaki voltaj olarak ifade edilir;

$$V_{OC} = \frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \quad (4.2)$$

Kısa devre koşullarında teorik olarak voltaj 0'dır. Yani aktarılan yük;

$$Q_{SC} = \frac{S\sigma x(t)}{d_0 + x(t)} \quad (4.3)$$

ve elektrik akımı aşağıdaki gibidir;

$$I_{SC} = \frac{dQ_{SC}}{dt} = \frac{S\sigma d_0}{(d_0+x(t))^2} \frac{dx}{dt} = \frac{S\sigma d_0 v(t)}{(d_0+x(t))^2} \quad (4.4)$$

d_0 parametresi şu şekilde hesaplanır;

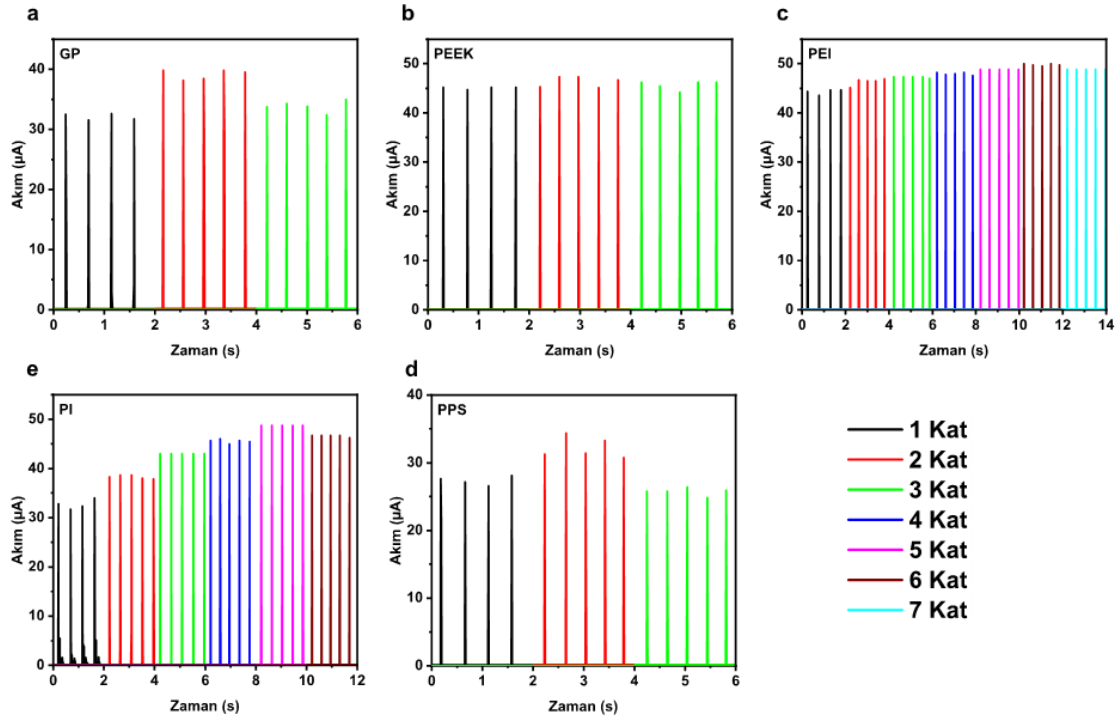
$$d_0 = \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \quad (4.5)$$

Devreye isteğe bağlı bir direnç bağlandığında, çıkış karakteristikleri aşağıdaki gibi hesaplanır (Niu, 2013);

$$V = I \times R = R \frac{dQ}{dt} \quad (4.6)$$

$$R \frac{dQ}{dt} = - \frac{Q}{S\epsilon_0} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (4.7)$$

Keçeler için dielektrik malzeme kalınlığına bağlı (d_1 veya d_2) olarak önce artar ve sonra azalır. Ancak, Denklem 4.1'e göre malzeme kalınlaştıkça voltaj değerlerinin düşmesi beklenir. Ek olarak, 4.3, 4.4 ve 4.7 denklemlerine göre malzeme kalınlığı arttıkça devredeki akım değerinin düşmesi beklenir. Ancak TENG'in elektriksel çıktıları sadece malzeme kalınlığına bağlı değildir. Optimum kalınlığa kadar artan elektriksel çıktılar değişen diğer parametrelere de bağlıdır.

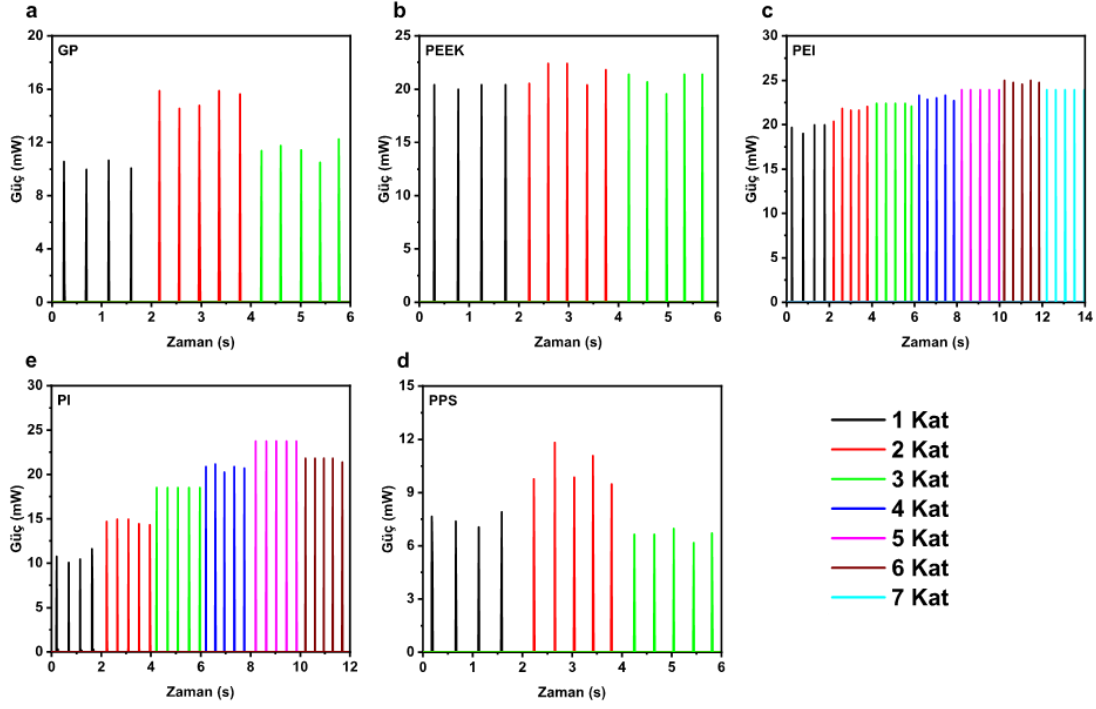


Şekil 4.13. Farklı katmanlarda a) GP, b) PEEK, c) PEİ, d) PPS ve e) PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için akım- zaman grafikleri

TENG'in çıkış performansını keçelerin katman sayısı artırılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.13'de ağırlıkça %2,5 Al 0,85 mm kalınlığında silikon ve farklı katmanlarda termoplastik keçelerden (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) yapılmış TENG'ler için akım- zaman grafikleri verilmiş olup bu çıkan elektriksel çıktılar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için akım değerleri

| Akım(µA) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| GP | 32,6 | 39,8 | 35 | | | | |
| PEEK | 45 | 47,3 | 42,6 | | | | |
| PEI | 44,6 | 46,9 | 47,3 | 48,2 | 48,9 | 50 | 48,9 |
| PI | 34 | 38,6 | 43 | 46 | 48,7 | 46,7 | |
| PPS | 28,1 | 34,3 | 26,4 | | | | |

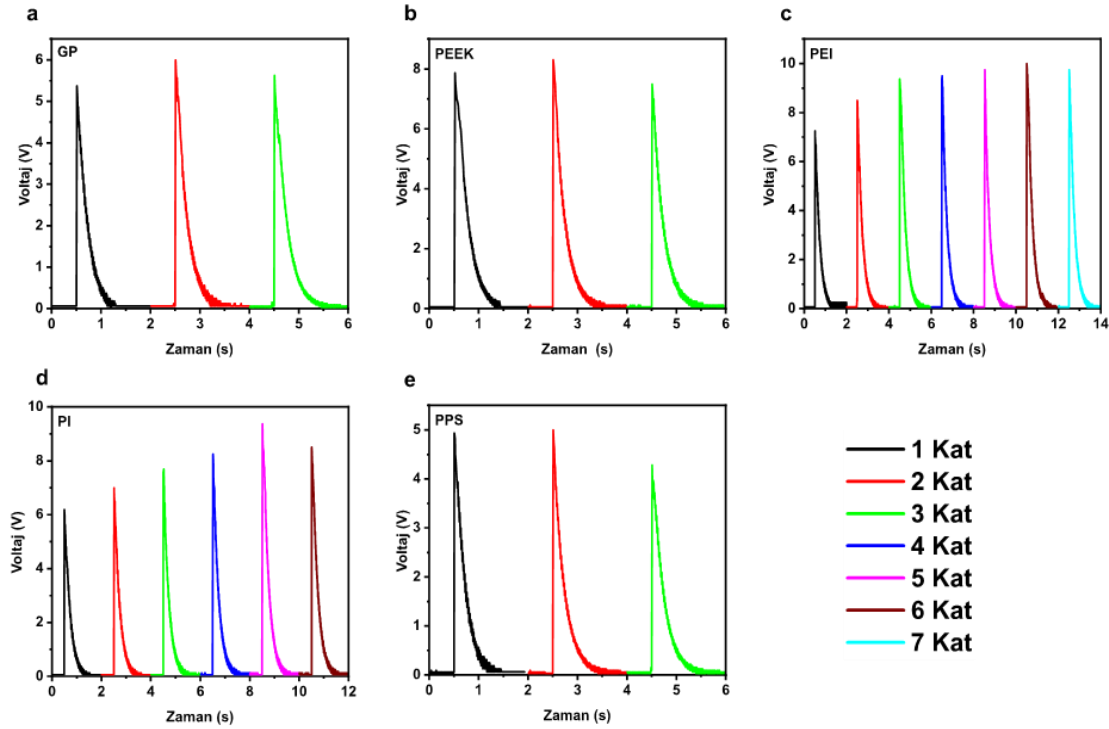


Şekil 4.14. Farklı katmanlarda a) GP, b) PEEK, c) PEİ, d) PPS ve e) PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için güç- zaman grafikleri

TENG'in çıkış performansını keçelerin katman sayısı artırılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, termoplastik keçelerin katman sayısındaki artışın TENG'lerin elektrik performansı üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Her şeyden önce, triboelektrik malzemenin kalınlığı, elektriksel potansiyel farkı oluşturmak için önemli bir parametredir. İkinci olarak, malzeme kalınlığına bağlı olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyon, etkin temas yüzey alanını etkilediği için kontak elektrifikasyonunda da çok önemlidir (Okbaz, 2021). Şekil 4.14'de ağırlıkça %2,5 Al 0,85 mm kalınlığında silikon ve farklı katmanlarda termoplastik keçelerden (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) yapılmış TENG'ler için akım- zaman grafikleri vermiş olup bu çıkan elektriksel çıktılar tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEI, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için güç değerleri

| Güç (mW) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| GP | 10,62 | 15,84 | 12,25 | | | | |
| PEEK | 20,25 | 22,37 | 18,14 | | | | |
| PEI | 19,89 | 21,99 | 22,37 | 23,23 | 23,91 | 25 | 23,91 |
| PI | 11,56 | 14,89 | 18,49 | 21,16 | 23,71 | 21,80 | |
| PPS | 7,89 | | | | | | |



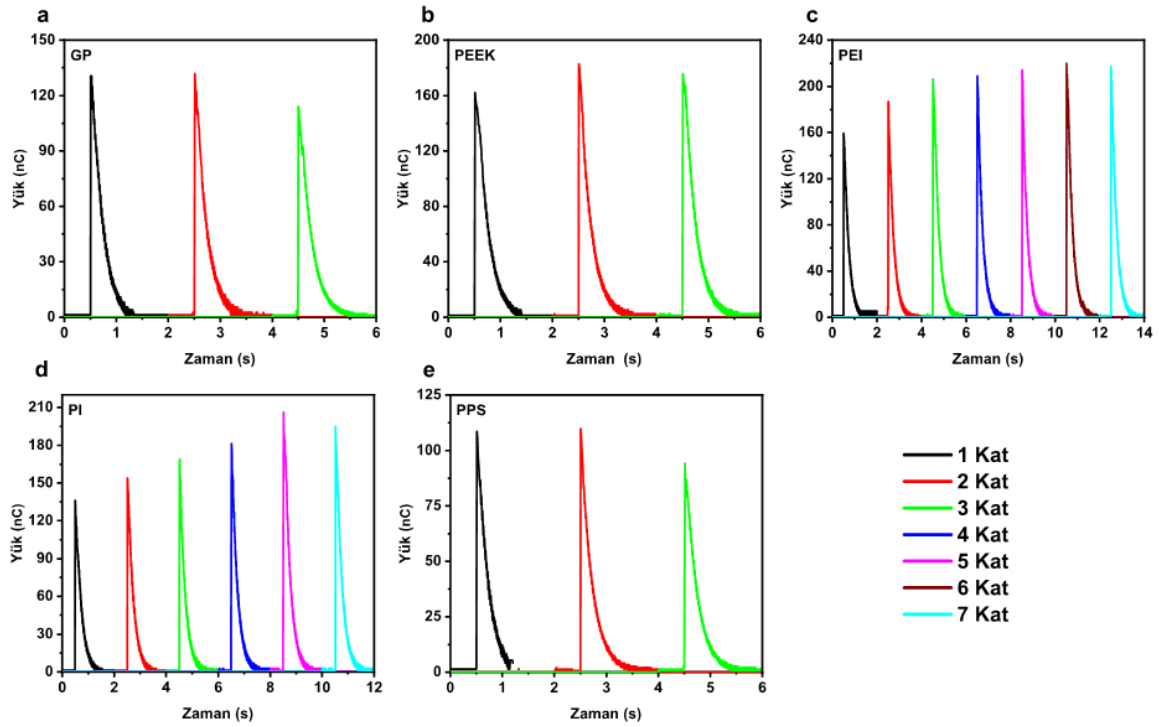
Şekil 4.15. Farklı katmanlarda a) GP, b) PEEK, c) PEI, d) PPS ve e) PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için voltaj- zaman grafikleri

Farklı kat kalınlığında termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için tek bir darbeye karşılık gelen şarj-deşarj eğrileri Şekil 4.15'de sunulmaktadır. Voltaj aniden tepe değerine ulaşır ve zamanla düşer (yaklaşık 1,5 s). Ölçülen çıkış voltajları kapasite voltajları ile uyumludur. Bu çalışmada, farklı katmanlarda keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için farklı kapasitif yükler altında şarj karakteristiği belirlenmemiştir.

Tablo 4.6. Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için voltaj değerleri

| Voltaj (V) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|------|------|------|------|------|-------|------|
| GP | 5,38 | 6,00 | 5,63 | | | | |
| PEEK | 7,88 | 8,31 | 7,50 | | | | |
| PEI | 7,25 | 8,50 | 9,38 | 9,50 | 9,75 | 10,00 | 9,75 |
| PI | 6,19 | 7,00 | 7,69 | 8,25 | 9,38 | 8,88 | |
| PPS | 4,94 | 5,00 | 4,28 | | | | |

Bu çalışmada, özellikle biyomekanik enerji üretimini göstermek için düşük frekans altında mekanik tetikleme uygulandı. TENG'ler hafif ve küçük boyutlarda üretilebiliyor olmalarıyla günlük hayatta insanların mekanik tepkilerini kullanarak elektrik enerjisine üretilebilirler. Bu durum TENG'lerin sürekli güç tedarikçileri veya şarj cihazları olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu nedenle TENG'lerin şarj özelliklerinin de belirlenmesi önemlidir.

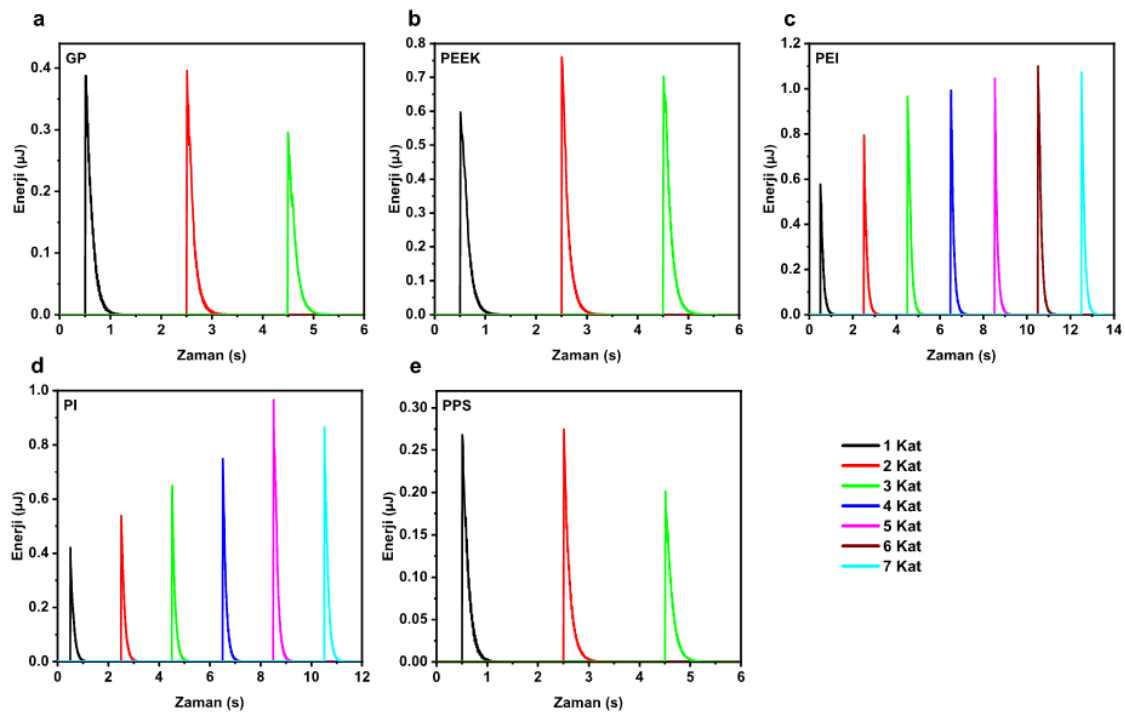


Şekil 4.16. Farklı katmanlarda a) GP, b) PEEK, c) PEİ, d) PPS ve e) PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için yük- zaman grafikleri

Farklı kat kalınlığında keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için tek bir darbeye karşılık gelen yük eğrileri Şekil 4.16'de sunulmaktadır. En iyi sonucu 6 kat katmanda PEI termoplastik keçeden üretilen TENG vermiştir.

Tablo 4.7. Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için yük Değerleri

| Yük(nC) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|---------|--------|---------|-------|--------|--------|-------|
| GP | 118,25 | 132 | 123,75 | | | | |
| PEEK | 173,25 | 182,82 | 165 | | | | |
| PEİ | 159,5 | 187 | 206,25 | 209 | 214,5 | 220 | 214,5 |
| PI | 136,125 | 154 | 169,125 | 181,5 | 206,25 | 195,25 | |
| PPS | 108,625 | 110 | 94,1875 | | | | |



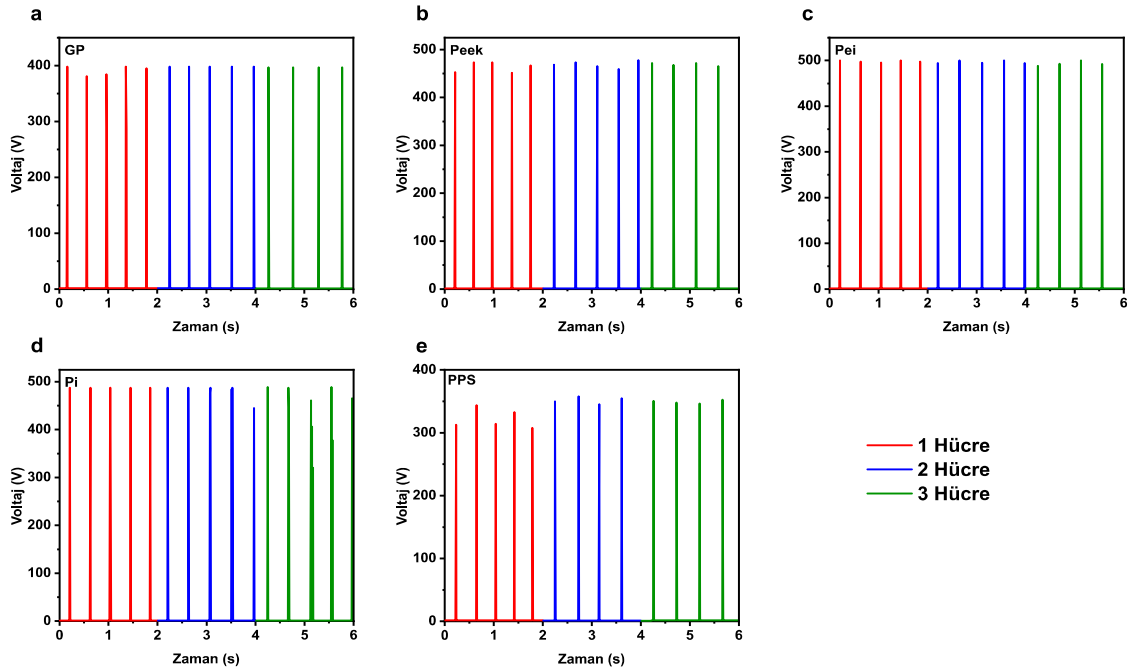
Şekil 4.17. Farklı katmanlarda a) GP, b) PEEK, c) PEİ, d) PPS ve e) PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için enerji- zaman grafikleri

Farklı kat kalınlığında termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için enerji eğrileri Şekil 4.17'de sunulmaktadır. Bu termoplastik keçeler arasında en iyi sonuç 6 kat kalındığında PEİ termoplastik keçe kullanılarak üretilen TENG'den elde edilmiştir. Depolanan enerji, kapasitör üzerindeki voltajın karesi ile değiştiğinden, depolanan enerjideki artış hızı, depolanan yükteki artışa kıyasla oldukça yüksektir. Ancak burada vurgulanması gereken önemli bir nokta vardır. Kondansatör üzerindeki voltaj, depolanan yük ve depolanan enerji, malzeme kalınlığına, malzemenin dielektrik özelliğine ve devreye bağlı kapasitörlerin değerine bağlıdır. TENG elektrik depolama özellikleri farklı kapasitif yükler altında değiştiğinden optimum kapasitif yükün belirlenmesi gerekir. Teorik olarak TENG kapasitansı devreye bağlı yük kapasitansına eşit olduğunda maksimum enerji kapasitörde depolanır (Niu , 2014). Ancak gerilim değeri de farklı amaçlarla kullanılan depolanan elektrik enerjisine uygun olacaktır.

Tablo 4.8. Farklı katmanlarda GP, PEEK, PEİ, PPS ve PI termoplastik keçeler kullanılarak üretilen TENG'ler için enerji değerleri

| Enerji(μ) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| GP | 0,31 | 0,39 | 0,34 | | | | |
| PEEK | 0,68 | 0,75 | 0,61 | | | | |
| PEI | 0,57 | 0,79 | 0,96 | 0,99 | 1,04 | 1,1 | 1,04 |
| PI | 0,42 | 0,53 | 0,65 | 0,74 | 0,96 | 0,86 | |
| PPS | 0,26 | 0,27 | 0,20 | | | | |

Elektrostatik indüksiyon ve potansiyel farkı ne kadar iyi olursa, elektrotlar arasında o kadar fazla elektron aktarılır. İkinci olarak, malzeme kalınlığına bağlı olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyon, etkin temas yüzey alanını etkilediği için kontak elektrifikasyonunda da çok önemlidir. Daha etkili temas yüzey alanı, triboelektrik malzemeler arasındaki yük transferini artırır ve dolayısıyla polarizasyon yoğunlaşır (Wang, 2019) (Zhang, 2018). Dielektrik malzemenin kalınlığının bir TENG'nin çıkış performansı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu deneysel sonuçlardan anlaşılmaktadır. Çıkış gerilimi, dielektrik kalınlığı ile belirli bir değere yükselip daha sonra azalmaya başlamıştır. Bunun nedeni, malzemenin düşük ve yüksek kalınlığı için sabit bir kuvvet altında ara yüzey deformasyon seviyelerinin farklı olması ve bu nedenle temas elektrifikasyonu için etkin temas alanının değişmesi ve dolayısıyla optimum dielektrik katmanların dış kuvvete bağlı olmasıdır.



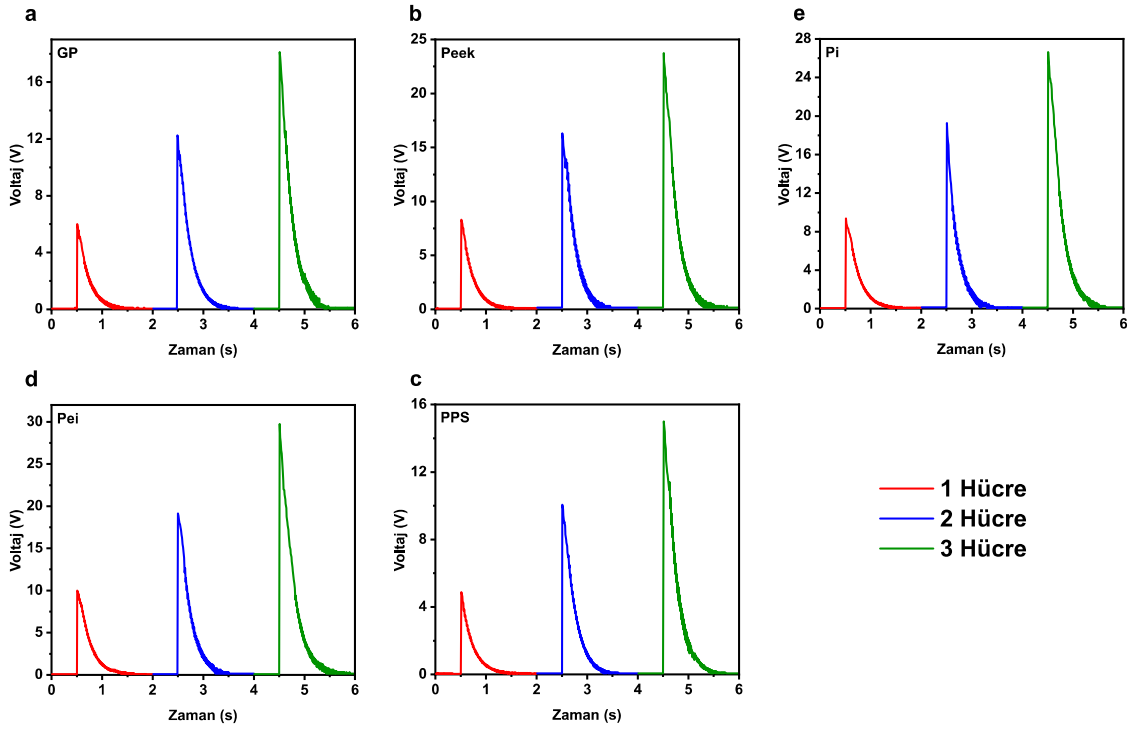
Şekil 4.18. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için tek darbeye karşılık gelen voltaj eğrileri

Ayrıca, TENG verimliliğini iyileştirmek için, termoplastik keçelerinin (GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS) optimum katmanları kullanılarak TENG hücre sayıları arttırılarak elektriksel çıktılar incelenmiştir. Şekil 4.18’ de Al katkılı silikon ve termoplastik keçe (GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS) kullanılarak üretilen farklı hücre sayıları kullanılarak üretilen TENG’lerin anlık voltaj ölçümleri verilmiştir. TENG’ler paralel bağlandığından hücre sayısındaki artışa rağmen çıkış geriliminin sabit kalmış. Hücre sayısı arttıkça TENG voltajının hemen hemen birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Gerilimdeki artış, hücre sayısı ile doğru orantılı olan çıkış akımının büyütülmesine bağlanır (Okbaz, 2022).

Tablo 4.9. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için voltaj değerleri

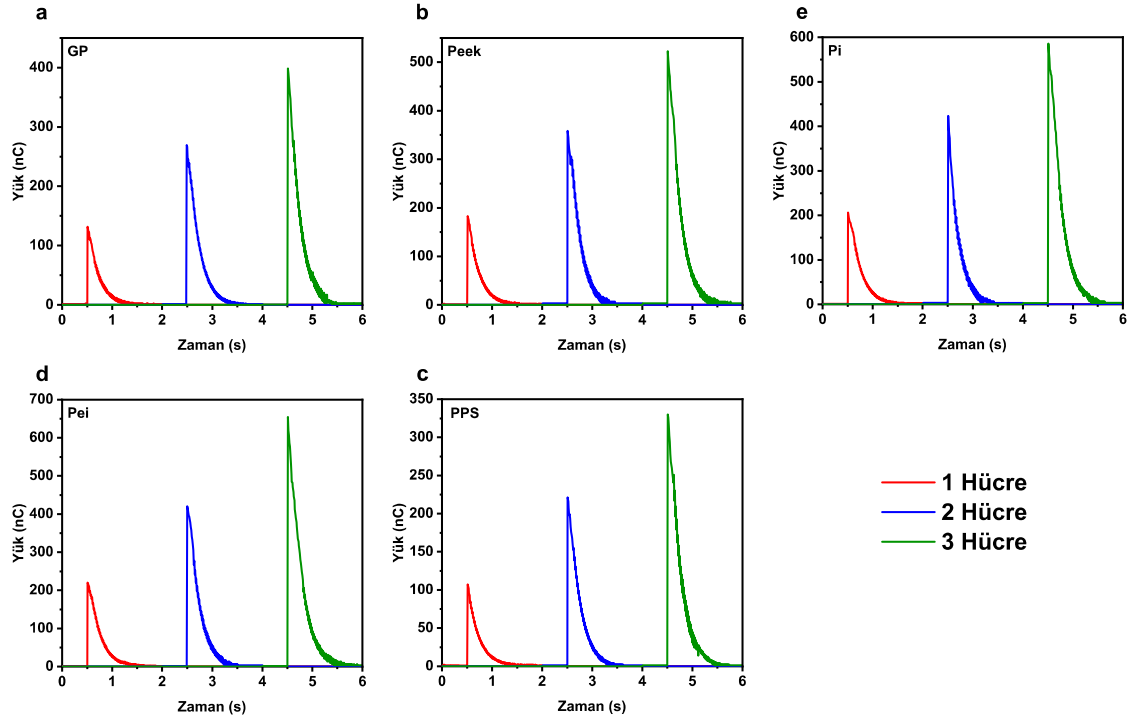
| Voltaj (V) | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|----------|----------|----------|
| GP | 6 | 12,25 | 18,12 |
| PEEK | 8,31 | 16,31 | 23,75 |
| PEI | 10 | 19,12 | 29,75 |
| PI | 9,37 | 19,25 | 26,62 |
| PPS | 4,87 | 10,06 | 15 |

Şekil 4.19’da Al katkılı silikon ve termoplastik keçe (GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS) kullanılarak üretilen farklı hücre sayıları kullanılarak üretilen TENG’lerin tek darbeye karşılık gelen şarj-deşarj eğrileri verilmiştir. TENG’lerin şarj-deşarj sürelerini kısa tutmak için 0.022 μ F bir kapasitör kullanılmıştır. Artan hücre sayısına bağlı bir şekilde kapasitör şarjları artmıştır. Bunun nedeni etkili temas yüzey alanındaki ve buna bağlı olarak depolanan yük miktarının artmadır.



Şekil 4.19. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok katlı TENG'ler için tek darbeye karşılık gelen kapasitör şarj-deşarj eğrileri

Çeşitli malzemeler ile fabrikasyonu yapılan triboelektrik nanojeneratörlerin tek darbeli ve zamana bağlı kapasitör voltajları incelendiğinde en yüksek çıkış voltajına kadar şarj eden malzemenin PEİ olduğu gözlemlenmiştir. Voltaj değerleri özellikle TENGlerin sensör olarak kullanılması durumunda sensör hassasiyetleri için önemli bir parametredir. Belirli büyüklükte ve frekansta bir kuvvet altında çıkış voltajları ne kadar yüksek olursa herhangi bir mekanik etkiyi algılama kabiliyetleri de o kadar artar. Bu nedenle farklı dirençler altındaki çıkış gerilimlerinin tespiti önem arz etmektedir. Bunların yanında TENGler elektrik güç kaynağı olarak da kullanılmaktadır. Ürettikleri voltaj değeri kadar elektrik güç değeri de bu nedenle önemlidir. Farklı kapasite ve özelliklerdeki cihazların güç ihtiyaçları TENG ile sağlanmak istenmesi durumunda üretilen elektrik akımı farklı dirençlere maruz kalacaktır. TENG'lerin enerji üretim kapasitesini artırmanın en önemli yollarından biri çok hücreli TENG tasarımları kullanmaktır. TENG'ler paralel bağlandığından çıkış voltajları aynıdır, ancak üretilen akım katman sayısı ile orantılı olarak yoğunlaşır.

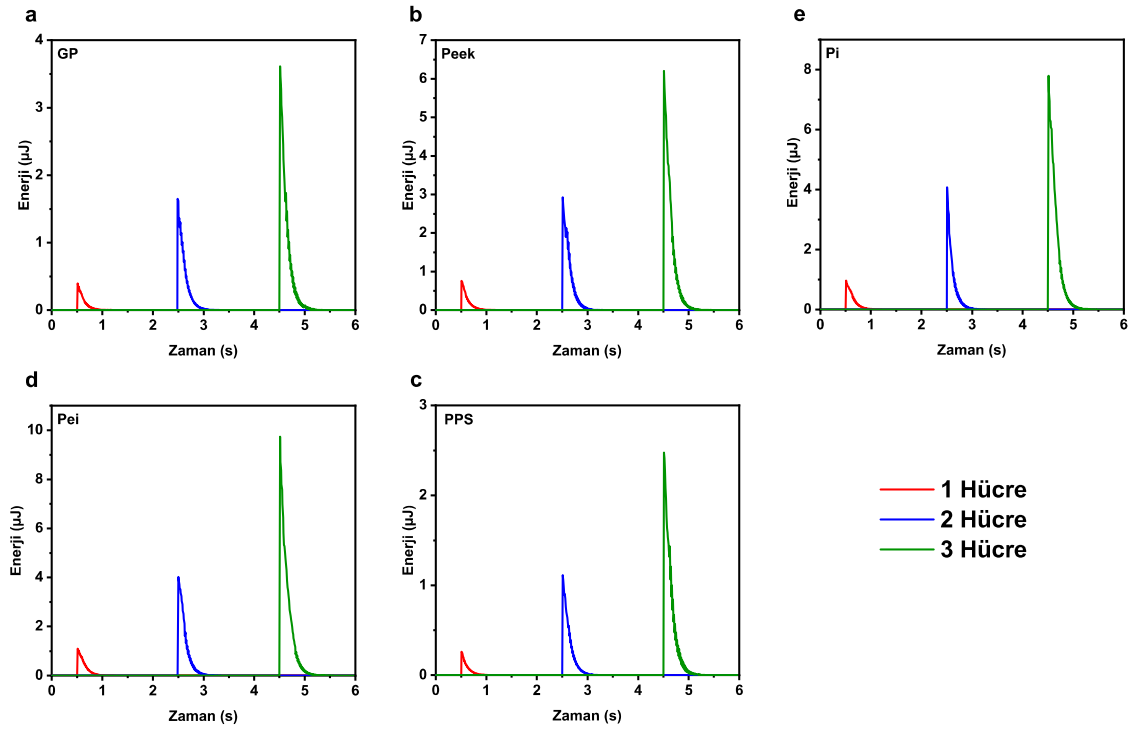


Şekil 4.20. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için yük eğrileri

Şekil 4.20'de Al katkılı silikon ve termoplastik keçe (GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS) kullanılarak üretilen farklı hücre sayıları kullanılarak üretilen TENG'ler için yük hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4.10 verilmiştir. Tüm keçeler için en iyi sonuç 3 hücreli TENG modelinde elde edilmiştir.

Tablo 4.10. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için yük değerleri

| Yük(nC) | 1 | 2 | 3 |
|---------|--------|--------|--------|
| GP | 132 | 269,5 | 398,75 |
| PEEK | 182,82 | 358,87 | 522,5 |
| PEI | 220 | 420,75 | 654,5 |
| PI | 206,25 | 423,5 | 585,75 |
| PPS | 107,25 | 221,37 | 330 |



Şekil 4.21. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için enerji eğrileri

Şekil 4.21'de Al katkılı silikon ve termoplastik keçe (GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS) kullanılarak üretilen farklı hücre sayıları kullanılarak üretilen TENG'lerin enerji hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4.11'da verilmiştir. Tüm keçeler için en iyi sonuç 3 hücreli TENG modelinde elde edilmiştir. Ancak hücre sayısındaki artış bir yere kadar çıkış performansını iyileştirebilir. Çünkü belli bir hücre sayısındaki artıştan sonra bir TENG'e düşen kuvvet miktarı azalır. Kuvvetin azalmasıyla dielektrik malzemelerin temas eden yüzeylerinde de bir azalma görülür.

Tablo 4.11. GP, PEEK, PEİ, PI ve PPS termoplastik keçelerin optimum katmanlarında üretilen çok hücreli TENG'ler için enerji değerleri

| Enerji (μ J) | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|------|------|------|
| GP | 0,39 | 1,65 | 3,61 |
| PEEK | 0,75 | 2,92 | 6,20 |
| PEI | 1,1 | 4,02 | 9,73 |
| PI | 0,96 | 4,07 | 7,79 |
| PPS | 0,26 | 1,11 | 2,47 |

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

TENG'ler, her yerde yaygın olan mekanik hareketleri elektrostatik prensiplere bağılı olarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. TENG'ler, yalnızca pratiklik sağlamaz aynı zamanda çevre dostu enerji üretimi gerçekleştirir. Ancak TENG'lerin enerji verimliliği düşüktür ve kendi kendine çalışan elektronik cihazlarda yaygın bir şekilde kullanımı için arttırılması gerekmektedir. TENG'lerin enerji verimliliği, daha yüksek elektrik şarj kapasitesine sahip yeni dielektrik malzemeler kullanılarak artırılabilir. Bu çalışmanın temel amacı enerji verimliliğini arttırmaya yönelik olup farklı malzemelerin TENG'lerin elektriksel çıktı performanslarının verimliliğini arttırmaktır.

Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada tribo-katmanlar olarak %2,5 Al katkılı silikon ve termoplastik keçeler (Poliimid (PI), Polifenilen Sülfid (PPS), Polietereterketon (PEEK), Polieterimid (PEI) ve Poliimid bağlayıcı ince cam (GP) kullanılarak her termoplastik keçe için farklı TENG'ler üretilmiştir. Üretilen bu TENG'ler biyomekanik enerji üretimi için uygun bir dikey temas ayırma modu kullanılarak tasarlanmıştır. Termoplastik keçelerin yüzey morfolojisi için taramalı elektron mikroskobu (SEM), profilometre ve optik mikroskop kullanılmıştır. SEM görüntülerinden yola çıkarak termoplastik keçeler için lifli ve fiberimsi bir yapının olduğu ve liflerin bazı yüzeyleri arasında boşlukların gözlemlendiği sarmal bir yapısı olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinin İmage j programı ile yapılan analizlerinden çap ortalamaları hesaplanmıştır. Analizler sonucunda en yüksek çap ortalamasına sahip PEEK termoplastik keçe olduğu görülmüştür. İmage J programı ile yapılan analizler sonucunda çap ortalamalarının yüksek olandan düşük olana doğru sırasıyla; PEEK, PEI, PI, PPS ve GP olarak elde edildi. Optik ve profilometre mikroskop görüntü verilerden yola çıkarak Yüzey pürüzlülüğü (Ra), Ortalama karekökü (RRMS) ve Tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) hesaplanmıştır. En yüksek renk konsantrasyonuna ve tepeden tepeye aritmetik vadi yüksekliğine sahip PEEK'tir. En düşük renk konsantrasyonuna ve vadilere sahip olan termoplastik keçe ise PI'dır. Termoplastik keçeler arasında Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için en yüksekten en düşük olana doğru bir sıralama yapılırsa sırasıyla; PEI, PEEK, PPS, GP ve PI olarak elde edilir. Ortalama karekökü (RRMS) için sıralama yapılırsa sırasıyla; PEEK, PEI, GP, PPS ve PI olarak elde edilir. Son olarak Tepeden tepeye aritmetik ortalama vadi yüksekliği (Rpp) için bir sıralama yapılırsa sırasıyla; PEEK, GP, PPS, PEI ve PI olarak elde edilir.

Termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) kullanılarak üretilen TENG'lerin çıkış güçleri, voltajları ve akımları ölçülüp, ilk olarak 1 kat kalınlığında termoplastik keçelerin (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) elektriksel çıktı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçülere göre en iyi güç çıktısını veren malzemenin PEEK olduğu belirlenmiştir. PEEK kullanılarak üretilen TENG'in maksimum çıkış gücü 37,48 mW olarak hesaplanmıştır. İkinci olarak TENG'lerin çıkış gücünü iyileştirmek için termoplastik keçelerin (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) kat kalınlığı arttırılarak elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada GP, PEEK, PEI, PI ve PPS termoplastik keçeleri için optimize kat katmanları sırasıyla 2, 2, 6, 5 ve 2 kat katman olarak belirlenmiştir. Bu termoplastik keçeler arasında en iyi elektriksel çıkış performansı sergileyen PEI termoplastik keçesi olduğu belirlenmiştir. PEI termoplastik keçesinin anlık voltajları tek kat katmanda 446 V iken 6 kat katmanda 500 V olarak ölçülmüştür. Yani PEI termoplastik keçesinin kalınlığı arttırılarak PEI keçesinin anlık voltajı %12,1 kat arttırılmıştır. Son olarak katman optimizasyonu yapılan termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) için çok hücreli TENG fabrikasyonu yapıldı. Çok hücreli TENG tasarımında tüm termoplastik keçeler (GP, PEEK, PEI, PI ve PPS) anlık voltaj sabit kalırken kapasite geriliminin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlere

bakıldığında kat kalınlığındaki artış ve çok hücreli TENG kullanımının TENG'in çıktı performanslarında önemli bir katkısı olduğu söylenebilir.

Bu çalışma, PEI, GP, PI, PEEK ve PPS termoplastik keçe malzemelerinin esnekliği, enerji kaynağına uyarlanabilen ve esnek, giyilebilir ve katlanabilir elektronik cihazların güç ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılabilen esnek TENG tasarımlarına olanak tanır. Taşınabilir, giyilebilir ve kendi kendine çalışan elektroniklere güç sağlayabilen yüksek performanslı TENG'ler yapmak için kullanılma potansiyeline sahip olduğuna inanıyorum.

KAYNAKÇA

Ahmed, A., El-Kady, M. F., Hassan, I., Negm, A., Pourrahimi, A.M. & Muni, M. (2019). Fire-retardant, self-extinguishing triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, (59),336–345.

Bailey, A. G. (2001). *Journal of Electrostatics. The Charging of Insulator Surfaces*, (51), 82–90.

Chen, J., Yang J., Li, Z., Fan, X., Zi, Y. & Jing, Q. (2015). Networks of triboelectric nanogenerators for harvesting water wave energy: A potential approach toward blue energy. *ACS Nano*, (9), 3324–3331.

Choi, Y. M., Lee, M.G. & Jeon, Y. (2017). Wearable biomechanical energy harvesting technologies. *Energies*, 10(10), 1483.

Cui, N., Gu, L., Lei, Y., Liu, J. & Qin, Y. (2016). Dynamic behavior of the triboelectric charges and structural optimization of the friction layer for a triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 10(6), 6131–6138.

Das, P. S., Chhetry, A., Maharjan, P., Rasel, M. S. & Parkı, J. Y. (2019). A laser ablated graphene-based flexible self-powered pressure sensor for human gestures and finger pulse monitoring. *Nano Res*, 12, 1789–1795.

Fan, F. R., Tian, Z. Q. & Lin Wang, Z. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334.

- Gogurla, N., Roy, B., Park, J. Y. & Kim, S. (2019). Skin-contact actuated single-electrode protein triboelectric nanogenerator and strain sensor for biomechanical energy harvesting and motion sensing. *Nano Energy*, 62, 674–681.
- Huang, T., Zhang, J., Yu, B., Yu, H. & Long, H. (2019). Fabric texture design for boosting the performance of a knitted washable textile triboelectric nanogenerator as wearable power. *Nano Energy*, 58, 375–383.
- 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*, 40684.
- Kınaş, Z., Yar, A., Karabiber, A., Özen, A., Okbaz, A., Özel, F. & Ersöz, M. (2022). High-performance triboelectric nanogenerator based on carbon nanomaterials functionalized polyacrylonitrile nanofibers. *Energy*, 239, 122369.
- Wang, Z. L. (2020). Triboelectric Nanogenerator (TENG)—Sparking an Energy and Sensor Revolution. *Advanced Energy Materials*, 10(17).
- Lacks, P. I. & Lacks, D. J. (2012). A life of its own: The tenuous connection between thales of miletus and the study of electrostatic charging. *Journal of Electrostatics*, 70(3), 309–311.
- Lai, M., Du, B., Guo, H., Xi, Y. & Yang, H. (2018). Enhancing the Output Charge Density of TENG via Building Longitudinal Paths of Electrostatic Charges in the Contacting Layers. *ACS Appl Mater Interfaces*, 10, 2158–65.
- Lee, S., Ko, W., Oh, Y., Lee, J. & Baek, G. (2015). No Title Triboelectric energy harvester based on wearable textile platforms employing various surface morphologies. *Nano Energy*, 12, 410–418.
- Liang, X., Jiang, T., Liu, G., Xiao, T. & Xu, L. (2019). Triboelectric nanogenerator networks integrated with power management module for water wave energy harvesting. *Adv Funct Mater*, 29, 1–8.
- Liu, Z., Li, H., Shi, B., Fan, Y. & Wang, L. Z. (2019). Wearable and Implantable Triboelectric Nanogenerators. *Adv Funct Mater*, 29, 1–19.
- Magie, W. F. (1969). Source book in physics.
- Mule, A.R., Dudem, B., Patnam, H. & Graham, S. A. (2019). Wearable Single-Electrode-Mode Triboelectric Nanogenerator via Conductive Polymer-Coated Textiles for Self-Power Electronics. *ACS Sustain Chem Eng*, 7, 16450–16458.
- Niu, S. & Wang, Z. L. (2014). Theoretical systems of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 14, 161–192.
- Okbaz, A., Karabiber, A., Yar, A., Kınaş, Z., Sarılmaz, A. & Özel, F. (2022). High-performance triboelectric nanogenerator with optimized Al or Ti-embedded silicone tribomaterial. *Energy Conversion and Management*, 252, 115053.

Okbaz, A. (2022). GnP/PVDF decorated thermoplastic veils to boost the triboelectric nanogenerator output performance toward highly efficient energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 270, 116204.

Paradiso, J. A. (2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Comput*, 4, 18–27.

Olenick, R. P., & Apostol, T. M. (1986). *Beyond the mechanical universe: from electricity to modern physics*. Cambridge University Press.

Niu, S., Wang, Z. L., Lin, Y., Liu, Y. S., & Zhou, Y. H. (2013). Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy Environ Sci*, 6(12), 3576.

Shi, K., Chai, B., Zou, H., Min, D., Li, S. & Jiang, P. (2022). Dielectric Manipulated Charge Dynamics in Contact Electrification. *Research a Science Partner Journal*, 12.

Smythe, W. R. (1989). *Static and dynamic electricity*. Hemisphere Publishing Corporation New York, 3.

Sun, R., Gao, L., Shou, M., Li, B., Chen, X., Wang, F., Mu, X. & Xie, L. (2020). Tribo-material based on a magnetic polymeric composite for enhancing the performance of triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 105402.

Wang, M., Zhang, J., Tang, Y., Li, J. & Zhang, B. (2018). Air-Flow-Driven Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Real-Time Respiratory Monitoring. *ACS Nano*, 12, 6156–6162.

Wang, S., Jiang, Y., Tai, H., Liu, B. & Duan, Z., (2019). An integrated flexible self-powered wearable respiration sensor. *Nano Energy*, 63, 103829.

Wang, S., Lin, L., Xie, Y., Jing, Q., Niu, S. & Wang, Z. L. (2013). Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism. *Nano Lett*, 13, 2226–2233.

Wang, S., Xie, Y., Niu, S., Lin, L. & Wang, Z. L. (2014). Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes. *Adv Mater*, 26, 2818–2824.

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.

Wang, Z. L. & Wang, A. C. (2019). On the origin of contact-electrification. *Materials Today*, 30(November), 34–51.

Wang, Z. L., Jiang, T. & Xu, L. (2017). Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *Nano Energy*, 39, 9–23.

Wu, W. (2019). *Stretchable electronics: functional materials, fabrication strategies and applications*. *Sci Technol Adv Mater*, 20, 187–224.

- Wu, Y., Luo, Y., Qu, J. & Daoud, W. A. (2019). Liquid single-electrode triboelectric nanogenerator based on graphene oxide dispersion for wearable electronics. *Nano Energy*, 64, 103948.
- Xu, C., Zi, Y., Wang, A. C., Zou, H., Dai, Y., He, X., ... & D.Wang, Z. L. (2018). On the Electron-Transfer Mechanism in the Contact-Electrification Effect. *Advanced Materials*, 30(15), 1–9.
- Su, Y., Yang, X., Zhong, H., Zhang, Z. & Wu, Y. J. (2014). Fully enclosed cylindrical single-electrode-based triboelectric nanogenerator. *ACS Appl Mater Interfaces*, 6, 553–559.
- Yang, J., Chen, J., Su, Y., Jing, Q. & Li, Z. (2015). Eardrum-inspired active sensors for selfpowered cardiovascular system characterization and throat-attached anti-interference voice recognition. *Adv Mater*, 27, 1316–1326.
- Yang, Y., Zhou, Y.S., Zhang, H., Liu, Y., Lee, S. & Wang, Z. L. (2013). A single-electrode based triboelectric nanogenerator as self-powered tracking system. *Adv Mater*, 25, 6594–6601.
- Yang, Y., Zhu, G., Zhang, H., Chen, J., Zhong, X. & Wang, L. Z. (2013). Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system. *ACS Nano*, 7, 9461–9468.
- Yar, A., Kınaş, Z., Karabiber, A., Özen, A., Okbaz, A. & Özel, F. (2021). Enhanced performance of triboelectric nanogenerator based on polyamide-silver antimony sulfide nanofibers for energy harvesting. *Renewable Energy*, 179, 1781–1792.
- Yi, F., Lin, L., Niu, S., Yang, P. K. & Wang, Z. L. (2015). Stretchable-rubber-based triboelectric nanogenerator and its application as self-powered body motion sensors. *Adv Funct Mater*, 25, 3688–3696.
- Zhang, Z., Sun, X., Chen, Y. & Debeli, D.K. ç(2018). Comprehensive dependence of triboelectric nanogenerator on dielectric thickness and external impact for high electric outputs. *J Appl Phys*, 124((4)), 045106.
- Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F. & Tao, X.-M. (2014). Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications. *Advanced Materials*, 26((31)), 5310–5336.
- Zhang, H., Lu, Y. & Ghaffarinejad, A., (2018). Progressive contact-separate triboelectric nanogenerator based on conductive polyurethane foam regulated with a Bennet doubler conditioning circuit. *Nano Energy*, 51, 10–18.
- Zhang, L., Zhang, B., Chen, J., Jin, L. & Deng, W. (2016). Lawn structured triboelectric nanogenerators for scavenging sweeping wind energy on rooftops. *Adv Mater*, 28, 1650–1656.
- Zheng, L., Cheng, G., Chen, J., Lin, L. & Wang, J. (2015). A hybridized power panel to simultaneously generate electricity from sunlight, raindrops, and wind around the clock. *Adv Energy Mater*, 5, 1–9.
- Zhu, G., Bai, P., Chen, J. & Lin Wang, Z. L. (2013). Power-generating shoe insole based on triboelectric nanogenerators for self-powered consumer electronics. *Nano Energy*, 2((5)), 688–692.

Zhu, J., Wang, X. & Xing, Y. (2019). Highly Stretchable All-Rubber-Based Thread-Shaped Wearable Electronics for Human Motion Energy-Harvesting and Self-Powered Biomechanical Tracking. *Nanoscale Res Lett*, 14.

Wang, Z. L. (2017). On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators. *Mater Today*, 20, 74–82.

Wang, Z. L. & Wang, C. A. (2019). On the origin of contact-electrification. *Mater Today*, 30, (34-51).

Zou, Y. & Raveendran, V. (2020). Wearable triboelectric nanogenerators for biomechanical energy harvesting. *Nano Energy*, 77, 105303.