

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOFİBER TABANLI TRİBOELEKTRİK
NANOGENERATÖRLERİN VERİMİNİ ARTIRMAK İÇİN
DİELEKTRİK KATMANLARIN İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
AZRA AYŞE GÖRGÖZ

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER

BİNGÖL-2023

**NANOFİBER TABANLI TRİBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLERİN
VERİMİNİ ARTIRMAK İÇİN DİELEKTRİK KATMANLARIN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER danışmanlığında, Azra Ayşe GÖRGÖZ tarafından hazırlanan bu çalışma 19/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Faruk ÖZEL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Muzaffer ASLAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, “Yüksek Performanslı Triboelektrik Nanogeneratör Üretimleri İçin Nanofiber Tabanlı Dielektrik Malzemelerin Geliştirilmesi” adlı proje kapsamında (Proje No: 121M608) Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasının planlanması ve yürütülmesinde bilgi ve birikimlerini bana aktaran ve çalışmalarında her türlü desteği sağlayan Danışman Hocam Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER’e teşekkürü borç bilir, kendisine saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bugüne kadar hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan beni bugünlere getiren babam İhsan GÖRGÖZ’e, çalışmalarım boyunca bana hep manevi destek olan canım anneme, çalışmam esnasında yanımda olduğunu hissettiren kardeşlerim ve arkadaşlarıma minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Azra Ayşe GÖRGÖZ

Bingöl 2023

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Triboelektrik	4
2.2. Triboelektrik Nanogeneratörlerin Teorik Kökeni.....	5
2.3. TENG Parametresinin Hesaplanması	7
2.4. Triboelektrik Serisi	8
2.5. Triboelektrik Mekanizması	10
2.6. Triboelektrik Çalışma Modları	11
2.6.1. Temas Ayırma Modu	12
2.6.2. Kayan Mod	14
2.6.3. Tek Elektrot Modu	15
2.6.4. Bağımsız Triboelektrik Katman Modu	17
2.7. TENG Uygulamaları	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	23
3.1. Malzeme Üretimi	23
3.2. Triboelektrik Nanogeneratör İmalatı	24
3.3. Malzeme Karakterizasyonu	25
3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	25
3.3.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	27
3.4. TENG Elektriksel Parametre Ölçümü	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri	31

4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Görüntüleri	37
4.3. TENG'lerin Elektriksel Ölçümleri	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	56



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

B	: Manyetik akı yoğunluğu
C_{tr}	: Sistem kapasitansı
D	: Elektrik yer değiştirme alanı
d_{tr}	: Katmanlar arasındaki mesafe
E	: Elektrik alan şiddeti
H	: Manyetik alan şiddeti
I	: Akım
I_{SC}	: Kısa devre akımı
I_{tr}	: Elektrotlar arasındaki transfer akım
J	: Akım yoğunluğunu
J_D	: Yer değiştirme akımı
P	: Elektriksel güç
P_s	: Polarizasyon alanı
Q	: Kondansatörde depolanan yük miktarı
R	: Direnç
$R_{eş}$	: Eşdeğer direnç
S_{tr}	: Elektrot yüzey alanı
t	: Zaman
V	: Gerilim
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
ε	: Dielektrik sabiti
ε_0	: Boşluğun dielektrik katsayısı
ρ	: Yük yoğunluğu

<i>FEP</i>	: Florlu etilen propilen
<i>PA</i>	: Poliamid
<i>PAN</i>	: Poliakrilonitril
<i>PDMS</i>	: Polidimetilsiloksan
<i>PI</i>	: Poliimid
<i>PSDP</i>	: Pozitif duyarlı fotodiyot
<i>PTFE</i>	: Politetrafloroetilen
<i>PVB</i>	: Polivinil bütiral
<i>PVC</i>	: Polivinil klorür
<i>PVDF</i>	: Poliviniliden florür
<i>TENG</i>	: Triboelektrik Nanogeneratör

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Önerilen Triboelektrifikasyon Mekanizmalarının Şemaları	11
Şekil 2.2.	TENG çalışma modlarının şemaları. (a) Temas ayırma modu. (b) Kayar mod. (c) Tek elektrot modu. (d) Serbest duran triboelektrik katman modu.	12
Şekil 2.3.	Temas Ayırma Modunun Çalışma Mekanizması	13
Şekil 2.4.	Kaydırma modunun çalışma mekanizması.....	15
Şekil 2.5.	Tek elektrot modunun çalışma mekanizması.	16
Şekil 3.1.	Bu çalışmada kullanılan JEOL 6510 model SEM	26
Şekil 3.2.	(a) Kullanılan AFM cihazı (b) AFM temsili çalışma gösterimi	28
Şekil 4.1.	Saf PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 µm ve 1 µm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Saf PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.	33
Şekil 4.2.	Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 µm ve 1 µm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.	33
Şekil 4.3.	Ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 µm ve 1 µm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.	34
Şekil 4.4.	Ağırlıkça %5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 µm ve 1 µm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.	34
Şekil 4.5.	Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 µm ve 1 µm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği	34
Şekil 4.6.	Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 µm ve 1 µm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği	35
Şekil 4.7.	Saf PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası	35

Şekil 4.8.	%1 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası	35
Şekil 4.9.	%2,5 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası	36
Şekil 4.10.	%5 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası	36
Şekil 4.11.	%7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası	36
Şekil 4.12.	%10 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası	37
Şekil 4.13.	Saf PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü	38
Şekil 4.14.	Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $5 \times 5 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (c) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü	38
Şekil 4.15.	Ağırlıkça %2,5 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü.....	39
Şekil 4.16.	Ağırlıkça %5 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü.....	39
Şekil 4.17.	Ağırlıkça %7,5 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü.....	40
Şekil 4.18.	Ağırlıkça %10 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü.....	40

Şekil 4.19.	Farklı seviyelerde karpit katkılanan PVP'den üretilen TENG'lerin (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) karpit	42
-------------	--	----

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Farklı çalışmalarda triboelektrik serilerin karşılaştırılması [60].	8
Tablo 4.1.	Farklı karpit katkı oranlarındaki PVP nanofiber için 10×10 $[\mu\text{m}]$ 2 ölçülü ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), yüzey pürüzlülüğü ortalama karekökü (R_q) ve tepeden vadi yüksekliğine pürüzlülük (R_{pv}) değerleri.....	38

NANOFİBER TABANLI TRIBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLERİN VERİMİNİ ARTIRMAK İÇİN DİELEKTRİK KATMANLARIN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Elektronik cihazlar modern yaşamda giderek yaygınlaşmakta ve bu nedenle enerjiye olan talep ve yeni alternatif enerji kaynakları arayışı sürekli artmaktadır. Triboelektrik Nanogeneratörler (TENG), mekanik hareketleri elektrostatik prensiplerle elektrik enerjisine dönüştüren ve yakın gelecekte kendi kendine çalışan elektronik cihazlarda kullanım için umut vaat eden enerji dönüştürme teknolojileridir. Günümüzde TENG'lerden elde edilen anlık güç miktarı düşüktür ve günlük hayatta yaygın kullanımları için enerji verimliliklerinin artırılması gerekmektedir. Nanofiber dielektrikler, triboelektrik etkileşimler için daha etkili temas yüzeyleri sağlayan malzemelerdir. Artan etkili yüzey alanı, yük transferini güçlendirir, böylece elektrik enerjisi üretimini geliştirir. Ek olarak, TENG'lerin triboelektrik özellikleri, belirli malzemelerin katkılanmasıyla önemli ölçüde iyileştirilebilir. Nanofiber bazlı dielektrik katmanlarda, katkılama oranları ve malzeme türleri gibi faktörleri ayarlayarak triboelektrik performansını optimize etmek ve daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği elde etmek mümkündür. Nanofiberlerin bir diğer önemli avantajı da hafif olmaları ve bu nedenle temas sırasında yük transferini başlatmak için minimum mekanik kuvvet gerektirmeleridir. Bu avantajlar, nanofiber tabanlı TENG'lerin düşük frekanslı titreşimler veya küçük hareketler altında bile verimli çalışmasını sağlar.

Bu çalışma, nanofiber tabanlı TENG'lerin verimliliğini artırmak için pozitif dielektrik katmana karpit katkısının rolünü araştırmaktadır. Deneylerde kullanılan TENG'lerde pozitif ve negatif katman olarak sırasıyla, ağırlıkça farklı oranlarda karpit katkılı PVP ve katkısız PAN kullanılmıştır. Katkılı PVP'ler ve PAN elektrospin teknolojisi kullanılarak nanofiberlere dönüştürülmüştür. Üretilen nanofiberlerin SEM ve AFM analizleri yapılmıştır. Triboelektrik özellikleri analiz etmek için değişen karpit katkı oranlarına (%1, %2,5, %5, %7,5 ve %10) sahip PVP'den üretilen TENG'lerin elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göre ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberler kullanılarak üretilen TENG'ler en yüksek güç çıkışını vermektedir. TENG'lerin elektriksel güç çıkışı %2,5 karpit katkı oranına kadar artmakta ve sonrasında kademeli bir şekilde azalmaktadır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, artan enerji talebine yönelik sürdürülebilir bir enerji üretim aracı olan TENG'lerin gelişimi için önemli çıkarımlara sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Triboelektrik nanogeneratör, nanofiber dielektrik katman, enerji verimliliği, kendinden enerjili cihazlar.

IMPROVEMENT OF DIELECTRIC LAYERS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF NANOFIBER-BASED TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS

ABSTRACT

Electronic devices are becoming increasingly common in modern life, and therefore the demand for energy and the search for new alternative energy sources are constantly increasing. Triboelectric Nanogenerators (TENG) are energy conversion technologies that convert mechanical movements into electrical energy with electrostatic principles and are promising for use in self-powered electronic devices in the near future. The amount of instantaneous power obtained from TENGs today is low and their energy efficiency needs to be increased for their widespread use in daily life. Nanofiber dielectrics are materials that provide more effective contact surfaces for triboelectric interactions. The increased effective surface area strengthens charge transfer, thereby improving electrical energy production. In addition, the triboelectric properties of TENGs can be significantly improved by doping certain materials. In nanofiber-based dielectric layers, it is possible to optimize triboelectric performance and achieve higher energy conversion efficiency by adjusting factors such as doping rates and material types. Another important advantage of nanofibers is that they are light and therefore require minimal mechanical force to initiate charge transfer during contact. These advantages enable nanofiber-based TENGs to operate efficiently even under low-frequency vibrations or small movements.

This study explores the role of carbide additive to the positive dielectric layer to improve the efficiency of nanofiber-based TENGs. Carbide doped PVP and undoped PAN were used as positive and negative layers, respectively, in different weight ratios in TENGs used in the experiments. Doped PVPs and PAN were converted into nanofibers using electrospinning technology. SEM and AFM analyses of the produced nanofibers were performed. To analyze the triboelectric properties, electrical measurements of TENGs produced from PVP with varying carbide additive ratios (1%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10%) were made. According to the results obtained, TENGs produced by using 2.5% carbide doped PVP nanofibers give the highest power output. The electrical power output of TENGs increases up to 2.5% carbide additives and then gradually decreases. The findings obtained in this study have important implications for the development of TENGs, which are a sustainable energy production tool for increasing energy demand.

Keywords: Triboelectric nanogenerator, nanofiber dielectric layer, energy efficiency, self-powered devices.

GİRİŞ

Dünyadaki elektronik teknolojisinin dikkat çeken gelişimi, genel bir minyatürleştirme, taşınabilirlik ve işlevsellik eğilimini takip etmektedir. Bilgisayarlar, vakum tüplü büyük boyutlu makinelerden yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) tabanlı ana çerçeve bilgisayarlara ve daha sonra dizüstü bilgisayarlara kadar tipik bir minyatürleştirme örneği olarak karşımıza çıkmaktadır [1-2]. Cep telefonlarının kullanımındaki dikkat çekici artış, mobil elektroniğin tipik örneği arasında yer almaktadır. Yakın gelecekteki gelişme, bir cep telefonunun boyutundan çok daha küçük olan elektronik cihazlarla ilgilidir. Bu gelişim düzinelerce, hatta yüzlerce benzer türde küçük elektronik cihazın var olacağı anlamına gelmektedir. Bu tarz küçük boyutlu elektronik cihazlar, çok düşük güç tüketiminde çalışıklarından, yaşam ortamımızda toplanan enerjinin bu alanda kullanılması istenmektedir. Bu nedenle, ultra hassas sensörler, nano robotlar, mikro-elektromekanik sistemler, uzak ve mobil çevre sensörleri ve taşınabilir/giyilebilir kişisel elektronik cihazlar için yaygın olarak kullanılabilecek güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır [3].

Alternatif bir enerji kaynağı olarak insanların günlük hayatından elde ettiği mekanik enerji, giyilebilir ve taşınabilir elektronik cihazlar ile elektrik enerjisine dönüştürülebilir [3]. Son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeler, her zamankinden daha taşınabilir, giyilebilir, bağımsız ve hatta minyatür elektronik devreler çağını başlatmıştır [4]. Taşınabilir ve giyilebilir elektronik cihazlar, elektrik şebekelerinden bağımsız olarak çalışabilmeleri için pillere ihtiyaç duyarlar. Piller hem maliyetli hem de ağırdır. Bu nedenle, kendi kendine çalışabilen elektronik cihazlar tasarlamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynakları geliştirilmiştir [5-6]. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri dünyanın en popüler yenilenebilir enerji kaynakları arasında olmasına rağmen, bu kaynaklar kapalı ortamlarda veya mobil uygulamalarda kullanılan küçük cihazlar için uygun değildir [7-8].

Son on yılda, ortamdaki mekanik hareketlerden yararlanmak için Triboelektrik Nanogeneratör (TENG) olarak adlandırılan yeni bir tür enerji toplama/depolama

teknolojisi ortaya çıkmıştır [9-10]. TENG, triboelektrik etki ve elektrostatik indüksiyon kanunlarından faydalananak yeni ve benzersiz bir mekanizmayı kullanıma sunan teknoloji ürünüdür.

Yapılarının basitliği, uygun maliyetli üretim ve mekanik dayanıklılık gibi avantajları nedeniyle TENG'ler, kendi kendine çalışan elektronik devreler için en umut verici güç üretim teknolojisi olarak görülmektedir [11-12]. TENG'ler yüksek güç yoğunluğu, hafiflik, küçük boyut, düşük maliyet, esneklik ve hatta şeffaflık dâhil olmak üzere diğer gelişmiş mevcut teknolojilere göre önemli avantajlar sunmaktadır [12]. TENG'ler, adım atma, nefes alma, nabız ve kol hareketleri gibi insan hareketlerinin ürettiği mekanik enerjiyi elektrostatik prensiplere dayalı olarak elektrik enerjisine dönüştürmektedir [13]. Temel olarak, farklı tribo-polaritelere sahip iki tabaka arasındaki temasın birleştirme etkisi, iki tabakanın yüzeyinde farklı triboelektrik polariteler meydana getirmektedir. Triboelektrik yükler, iki katman tekrar tekrar temas ettirildiğinde ve bir dış kuvvet tarafından serbest bırakıldığında, bir dış devre tarafından ileri ve geri aktarılabilir [14-16].

Bir TENG'in performansı, triboelektrik potansiyel, kullanılan malzemeler, yüzey morfolojisi, dielektrik sabiti ve cihazın tasarımı gibi bir dizi faktörden etkilenmektedir [17-20]. TENG'lerin dielektrik katmanında; poliviniliden florür (PVDF), poliimid (PI), polidimetilsiloksan (PDMS), polivinil klorür (PVC), florluetilenpropilen (FEP) ve poli tetrafloretillen (PTFE) gibi maliyeti düşük, kullanılabilirlik düzeyi yüksek ve işlenebilirlik kolaylığı bulunan en yaygın kullanıma sahip tribo-negatif malzemeler kullanılabilir [21-23]. Tribo-pozitif materyaller tribo-negatif materyallerle karşılaştırıldığında çeşitliliği sınırlıdır. Yaygın olarak kullanılan tribo-pozitif malzemeler poliamid (PA), selüloz, metaller ve metal oksitlerdir [24], [25]. Polimerler esnek malzemeler olmalarına ve metallere ve metal oksitlere göre işlenmesi kolay olmalarına rağmen daha düşük tribo-pozitif etkiye sahiptirler. Polimer malzemeleri doğrudan kullanmak yerine, fiziksel temas alanını ve triboelektrik potansiyeli geliştirmek geçerli bir yöntem olarak görülmektedir.

Bu amaçla mikro/nano modellere dayalı bir kare, yarım küre ve piramit oluşturulmaktadır. Triboelektrifikasyon etkisini iyileştirmek için, pozitif polimer

malzemelerin yüzeyleri, nano tüpler, moleküller, nano parçacıklar, nano teller ve grafen oksidi kapsayan çeşitli mevcut nano yapılar tarafından fiziksel ve kimyasal olarak değiştirilebilmektedir [5], [10], [26]. Temas karakteristiği, polimer yüzeylere nano yapıların eklenmesiyle değiştirilebilir ve böylece triboelektrifikasyonu artırabilir. Bu bağlamda, nano yapıları polimer matrislerine temas malzemesi olarak yerleştirmek, malzemelerin hem yüzey elektrifikasyonunu hem de geçirgenliğini değiştirmektedir. Böylece elektrifikasyon ve elektrostatik indüksiyon faktörleri daha etkili hale getirilmektedir [5].

Günümüzde, TENG'lerin enerji verimliliği düşüktür ve kendi kendine çalışan elektronik cihazlarda kullanım için artırılması gerekmektedir. Enerji verimliliği, daha yüksek elektrik şarj kapasitesine sahip yeni dielektrik malzemeler geliştirilerek artırılabilir. Bu çalışmada, TENG'lerin çıkış performansını iyileştirmek ve daha yüksek güç yoğunluğu elde etmek için sırasıyla negatif ve pozitif dielektrik katmanlar olarak PAN ve ağırlıkça farklı oranlarda karpit katkı PVP'lerden esnek nanofiberlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda belli $4 \times 4 \text{ cm}^2$ etkin yüzey alanına sahip TENG'ler hazırlanmış ve farklı yük koşullarında güç ölçümleri yapılmıştır. Güç ölçümleri sonucunda maksimum güç çıkışını veren karpit katkı oranı belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Triboelektrik

İlk olarak 2012 yılında ortaya çıkan, ardından araştırmacılar tarafından yoğun biçimde çalışma konusu olan Triboelektrik (TE) enerji hasatçılar; tasarım ve geniş malzeme seçenekleri, yüksek güç çıkışları, küçük boyutlar, nano teknoloji ile uyumluluk, hafif ve esnek yapı, düşük maliyet ve taşınabilir/giyilebilir cihazlara monte edilebilme özelliği ile geleceğin enerji teknolojisi adayıdır [27].

TE etki, bir malzemenin farklı bir malzeme ile sürtünme yoluyla temas ettikten sonra elektriksel olarak yüklendiği temas kaynaklı bir elektriklenmedir. TE etki, günlük elektrostatik hareketlerin genel bir nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir malzemenin taşıyacağı yüklerin işareti, temas edeceği malzemenin polaritesine bağlı olarak değişmektedir [3]. TE etki, muhtemelen binlerce yıldır bilinen birkaç etkiden biridir. TE etki, en sık deneyimlenen etkilerden biri olmasına rağmen, çalışma prensiplerindeki ayrıntılar halen tartışılarak araştırılmaktadır [23].

Literatür incelendiğinde pek çok çalışmanın çeşitli fabrikasyon teknikleri kullanılarak desenli kabartmalarla yüzeyin modifikasyonu üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [28-30]. Bu teknikler arasında mikro desenleme [31], plazma aşındırma [32], nano kompozitler yapma [33], gözenekli malzemeler oluşturma [20] ve blok kopolimerler ekleme [34] yer almaktadır. Yukarıda verilen TENG'leri tasarlamak yüksek maliyetli imalat ve karmaşık yöntemler gerektirmektedir. TENG'lerin uygulamalarda kullanımının yaygınlaşması için TE malzemelerin basit tasarımlı ve uygun maliyetli olması istenmektedir. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmalarla hem elektrostatik indüksiyonda yük yoğunluğunu artırabilir hem de uygun maliyetli ve basit tasarımlı üretim gerçekleştirilebilir [5], [35].

Nanofiber dielektrik tasarımı, yüzey alanının büyüklüğü, yüzeyinin pürüzlülüğü ve esneklik gibi birçok benzersiz karakteristik ve özellikleri ile imal etmek için basit, çok

yönlü, uygun maliyetli ve umut verici bir yaklaşımdır [36-37]. Uygun maliyetli yaklaşımlarda başka pek çok özelliğe sahip nano kompozitler elde etmek için polimerleri, inorganik nano parçacıkları, metalleri, seramikleri, aktif maddeleri ve polimerleri bir araya getirme olanağı vardır [38-39]. Son zamanlarda, poli(viniliden florür-kotrifloroetilen) (P(VDF-TrFE)), poliviniliden florür (PVDF), poli(viniliden florür-koheksafloropropilen) (P(VDF-HFP)), poliamid (PA) gibi birçok polimerin ve poli(3-hidroksibutirat-ko-3-hidroksivalerat) (PHBV), triboelektrik nanogeneratör uygulamalarında TE malzemeler olarak kullanılmak üzere elektro-eğirme yöntemiyle kullanılması önerilmektedir [40-43]. Ek olarak, polimer nanofiberlere karbon nano tüp, grafen oksit, gümüş nano tel ve metal nano partiküller dâhil edilerek, TENG'lerin çıkış performansı önemli ölçüde geliştirilmek de mümkündür [44-45].

2.2. Triboelektrik Nanogeneratörlerin Teorik Kökeni

TENG'lerin çalışma prensipleri Maxwell denklemleriyle açıklanmaktadır. Maxwell denklemlerinin basit formları aşağıdaki gibidir [46-48]:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

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

Yukarıdaki denklemlerde sırası ile, Maxwell denklemlerini meydana getiren Gauss Yasası, Faraday Endüksiyon Yasası, manyetizma için Gauss Yasası ve Ampere Yasası verilmiştir. Bu denklemlerde, manyetik alanı B , elektrik yer değiştirme alanını D , manyetik alan şiddeti H , elektrik alan şiddeti E , serbest akım yoğunluğunu J , serbest elektrik yükü yoğunluğunu ρ , zamanı ise t simgeler.

Bir elektromanyetik generatörün çıktığı akımı, zamanla değişen manyetik alandan kaynaklanır ve $\frac{\partial B}{\partial t}$ ile ifade edilir. Triboelektrik akımlar, Maxwell yer değiştirme akımı bileşenleriyle ilişkilidir. Bu akım, polarize edici yüzey yüklerinden dolayı

polarizasyon alanındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. 1861’de Maxwell ’in yer değiştirme akımı açıklanmış ve aşağıdaki gibi formüle edilmiştir [46-49].

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

Burada, P polarizasyon alanı ve ε_0 vakum elektrik iletkenlik katsayısıdır. Bu ifadenin zamana göre türevi aşağıdaki şekildedir:

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

burada J_D yer değiştirme akımını ifade etmektedir. İzotropik ortam için yer değiştirme akımı şu şekilde ifade edilebilir:

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

burada ε dielektriklerin elektrik geçirgenliğini ifade etmektedir. Yer değiştirme akımı, eğer yüzey polarizasyon yükleri varsa aşağıdaki gibi formüle edilmektedir [48]:

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

Burada P_s , polarize olan yüklerin indüklediği bir polarizasyon alanını ifade etmektedir. Sağdaki ilk terim, değişen elektrik alanı tarafından üretilen akımdır. Aynı kısımdaki ikinci terim, yüzey yüklerinin değişen polarizasyon alanının neden olduğu akımdır. Triboelektrik nanogeneratörlerde, iki dielektrik malzeme fiziksel temasa geçtiğinde her iki yüzey alanında da zıt elektrik yükler oluşacaktır. Ortaya çıkan elektrostatik alan, elektronların dış devre boyunca akışına sebep olacaktır. Dahili devre, yer değiştirme akımı ile ilgiliyken; harici akım, kapasitif iletkenlik akımı olacaktır [48].

Denklem 6’da gösterilen, Maxwell yer değiştirme akımı denkleminin sağ tarafındaki ilk terim, $\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$, telsiz iletişim [50], elektromanyetik dalga teorisinin ve dolayısıyla radyo [51], radar [52] gibi teknolojilerin gelişmesine yol açmıştır. İkinci terimde ise, yani polarize yüzey yükünün zamana bağlı değişiminin neden olduğu polarizasyon alanıysa,

piezoelektrik [53] ve triboelektrik nanogeneratörlerin geliştirilmesine imkan sağlamıştır. Triboelektrik nanogeneratörlerin, 2012 yılında Georgia Institute of Technology'den Prof. Wang ve ekibi tarafından akademik dünyaya tanıtılmasıyla [54]; Nesnelerin İnterneti (IoT) çağı için, gerekli yeni enerji teknolojisi için “kendi gücünü sağlayan sensörler”, “mavi enerji” ve “kendi kendini şarj eden sistemler” gibi kavramların geliştirilmesine yol açılmıştır [55], [48].

2.3. TENG Parametrelerinin Hesaplanması

Polariteleri farklı olan iki malzeme birbiriyle temas ettirildiğinde, triboelektrik etki sebebiyle yük transferi oluşarak her iki malzeme yüzeyinde birbirine zıt yüklenme gerçekleşir. Bu malzemeler temas etmeyen yüzeylerinden metal elektrotlara bağlı olması halinde, temas yüzeylerinin birbirinden ayrılması halinde elektrostatik indüksiyon etkisi ile yük birikimine neden olur. Matematiksel bir ifadeyle, yüzeylerdeki yük birikimi Q_f ile ifade edilirse, iki elektrot arasındaki başlangıç voltajı olan V_{tr} aşağıda verilen eşitlikteki gibi tanımlanabilir [56]:

$$V_{tr} = -\frac{Q_f d_{tr}}{\epsilon_0 S_{tr}} \quad (2.9)$$

Burada d_{tr} katmanlar arasındaki mesafeyi, ϵ_0 vakum elektriksel geçirgenliği, S_{tr} ise metal elektrotun yüzey alanını simgelemektedir. Aşağıda verilen eşitlikte ise, I_{tr} , yani dış elektrotlar arasında indüklenen akım gösterilmektedir [56]:

$$I_{tr} = C_{tr} \frac{\partial V_{tr}}{\partial t} + V_{tr} \frac{\partial C_{tr}}{\partial t} \quad (2.10)$$

Buradaki ifadede C_{tr} , sistemin sığasıdır. Triboelektrik etki sadece kitlesel niteliklere bağlı değildir, aynı zamanda temas yüzeyinden de etkilenir. Triboelektrik nanogeneratörlerin performansı, temas yüzeylerinin morfolojisini manipüle ederek, ayrılma hızına ve yüksek temasa sahip cihaz yapıları tasarımında ve elektron çekiminde büyük farklılıklar sergileyen yüzey malzemeleri kullanılarak geliştirilebilir [57].

2.4. Triboelektrik Serisi

Triboelektrifikasyon alanının ilk çalışması, 1757'de ilk olarak Wilcke tarafından geliştirilen [58], çeşitli malzemelerin göreceli triboelektrik polaritelerine göre listelendiği triboelektrik seridir. Bu serilerde, sistematik temas yükleme deneyleri ile bağlı polaritelerin elde edildiği alta ve üste yakın negatif ve pozitif yüklü çeşitli malzemeler sırasına göre listeye yerleştirilir.

Daha sonra, Jamin, Faraday ve Bouty, 19. yüzyılda triboelektrik serilerin ampirik listeleri üzerinde çalışma yaptılar ve arkasından da 1917'de Shaw, altın yapraklı elektroskop kullanarak temel metallerin triboelektrik serilerini, farklı kürk ve orman çeşitlerini ve diğer yalıtkanları elde etmek için çok sayıda deney yaptı [59]. Daha sonra, araştırmacılar polimer malzemeleri triboelektrik seriye dahil ettikçe, triboelektrik seriler üzerindeki ampirik çalışmalar daha da genişletildi. Literatürde yayınlanmış dört triboelektrik serisinin karşılaştırılması Tablo 2.1'de temsil edilmektedir.

Tablo 2. 1. Farklı çalışmalarda triboelektrik serilerin karşılaştırılması [60]

Ref. Coehn (1898)	Ref. Hersh (1955)	Ref. Henniker (1962)	Ref. Adams (1987)
Pozitif yük	Yün	Silika dolgulu silikon Elastomer Borosilikat cam, ateşle parlatılmış	Hava İnsan teli
	Naylon	Pencere camı anilin-formol reçinesi pofiberormaldehit polimetil metakrilat etilselüloz Poliamid 1	Asbest Tavşan kürkü Bardak Mika İnsan saçı
	Viskon	Poliamid 6-6	
Naylon 6,6		Kaya tuzu (NaCl) melanim formol Yün, örme Silika, ateşle cilalanmış	Naylon Yün Kürk İpek
	Pamuk	ipek, dokuma Polietilen glikol	
Selüloz	İpek	Süksinat selüloz asetat	

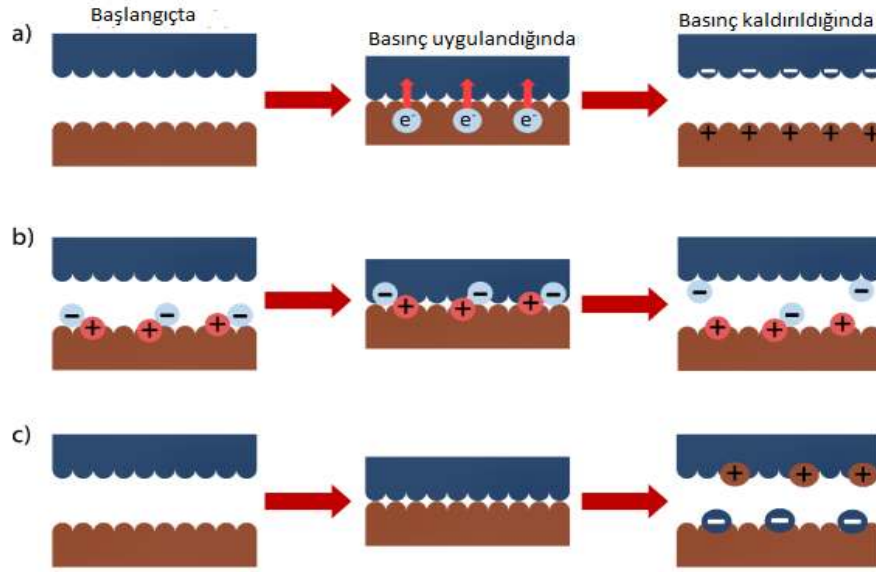
Tablo 2. 2. Devamı Farklı çalışmalarda triboelektrik serilerin karşılaştırılması [60]

Selüloz asetat		Polietilen glikol adipat Polidialil ftalat Selüloz (regener)	
	Asetat Lusit	sünger	
	Polivinil alkol Dakron	Pamuk, dokuma poliüretan elastomer Stiren-akrilonitril	Pamuk Çelik Odun
		Stiren-bütadien kopolimer	Kehribar
		Polistiren Poliizobütilen	
Polimetil Metakrilat Poliasetat		Poliüretan esnek sünger Borosilikat cam, zemin hali	Bakır, Nikel
	Orlon	Polietilen glikol tereftalat polivinil butiral formo-fenolik, sertleştirilmiş epoksit reçinesi	Gümüş, Pirinç Platin, Altın
polietilen tereftalat	Polivinil klorür	poliklorobütadien Bütadien-akrilonitril kopolimeri Doğal kauçuk poliakrilonitril	Kükürt Rayon, Asetat Polyester Strafor (Stiren) Orlon
		Kükürt	polietilen polipropilen
		polietilen polidifenilol propan karbonat	Vinil (PVC)
polistiren polietilen polipropilen		karbonat Klorlu polieter %25 DOP'lu polivinil klorür Plastikleştirici içermeyen polivinil klorür	Silikon Teflon Teflon
Negatif Yük		PolitriFlorokloroetilen Politetrafloroetilen Politetrafloroetilen	

Triboelektrik seride, daha yüksek konumdaki malzemeler, seri boyunca daha düşük bir konumdaki bir malzeme ile temas ettiğinde pozitif bir yük kazanacaktır. Böylece, triboelektrik seri, malzemelerin nispi yük polaritesini tahmin etmek için kullanılabilir [60]. Triboelektrik serilerin karşılaştırmasına daha yakından bakıldığında, seriler farklı laboratuvarlar tarafından üretilmesine rağmen, malzeme indeksleri veya sıralaması bazı farklılıklar dışında çok benzerdir. Temas süreçlerinin doğası ve deney düzeneklerindeki yüzey varyasyonları, tutarsız ölçümlerin ana nedenleri arasındadır [61]. Başka bir deyişle, temas basınçları, triboelektrifikasyon, yüzey kirlilikleri ve oksitler, sürtünme kuvvetlerinin büyüklüğü vb. bunlar bir dizi temas ve ayırma adımıdır ve farklı ölçümler için benzer koşulları ayarlamak çok zordur.

2.5. Triboelektrik Mekanizması

Temaslı elektrifikasyonun günlük hayattaki gözlemleri, doğa olaylarını ve endüstriyel uygulamalarını ve deneysel triboelektrik seriler üzerindeki çalışmaları içeren temas elektrifikasyonunun resmi kavramsal olarak açık olsa da arkasındaki teori hakkında aynı şeyi ifade etmek çok zordur. Fizikçiler, kimyagerler, mühendisler ve meteorologların triboelektrik yük oluşumunun arkasındaki teoriyi anlamaya çalıştıkları genel alanda devam eden araştırmalar var ve henüz kesin sonuçlara ulaşamadı [62-63]. Şimdiye kadar, triboelektrik yük oluşumunun altında yatan başlıca üç alternatif mekanizma olduğu düşünülmüştür: İyon transferi, elektron transferi ve malzeme transferi.

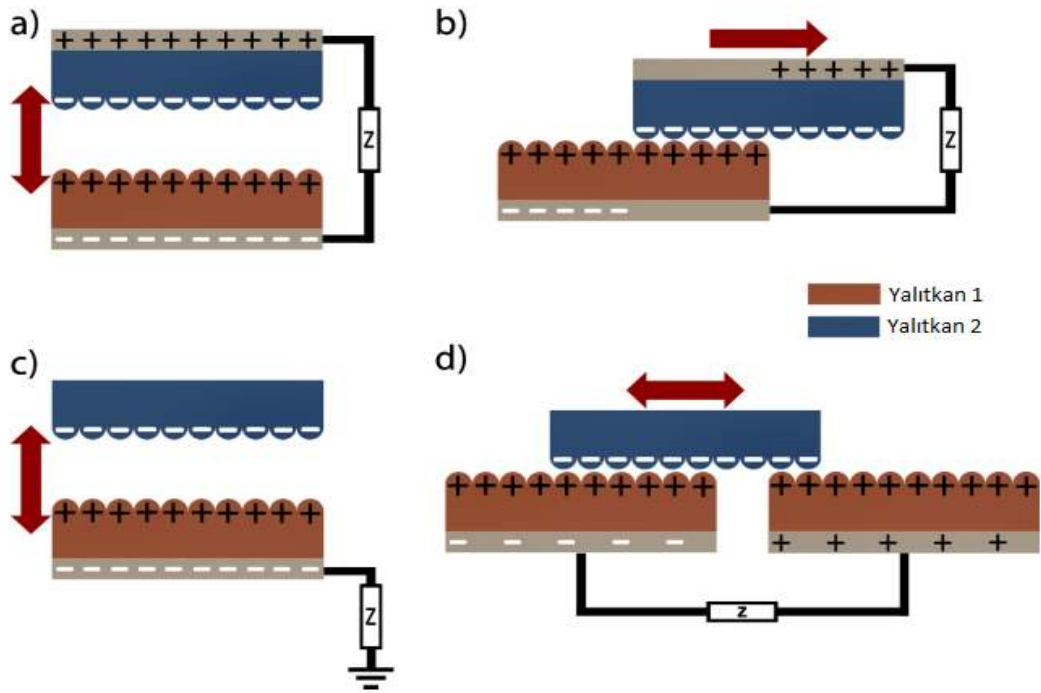


Şekil 2.1. Önerilen Triboelektrifikasyon Mekanizmalarının Şemaları

Önerilen triboelektrifikasyon mekanizmalarının şemaları Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Bu şemaya göre; Şekil 2.1 (a)’da malzemelerin iş fonksiyonlarındaki farklılık nedeniyle elektronların değiş tokuş edildiği bir elektron transfer mekanizması ve Şekil 2.1 (b)’de İyon transfer mekanizması, kuvvetli bir şekilde bağlanmış sabit iyonlar ve hareketli karşı iyonlar, hareketli iyonların yakın temaslardan sonra transfer edildiği sırasıyla pozitif ve negatif polariteler olarak temsil edilir. Son olarak Şekil 2.1 (c)’de yük oluşumunun transfer edilen malzeme türlerinden kaynaklandığı malzeme transfer mekanizması temsil edilmektedir.

2.6. Triboelektrik Çalışma Modları

Mekanik enerjiyi elektriğe dönüştüren TENG’ler, makro veya mikro ölçekli enerji toplama ve genel olarak kendi kendine çalışan sensörler dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanım alanına sahiptir. Bu uygulamalara paralel olarak, çevrede serbest hareket eden triboelektrik kaynaklar kullanılarak yapısal dielektriklerin güç üretimi ve triboelektrik şarjı için çeşitli konfigürasyonlar tasarlanmıştır ve bunlar dört ana kategoride toplanabilir: Temas ayırma modu, kayan mod, tekli elektrot modu ve serbest duran triboelektrik katman modu [64].

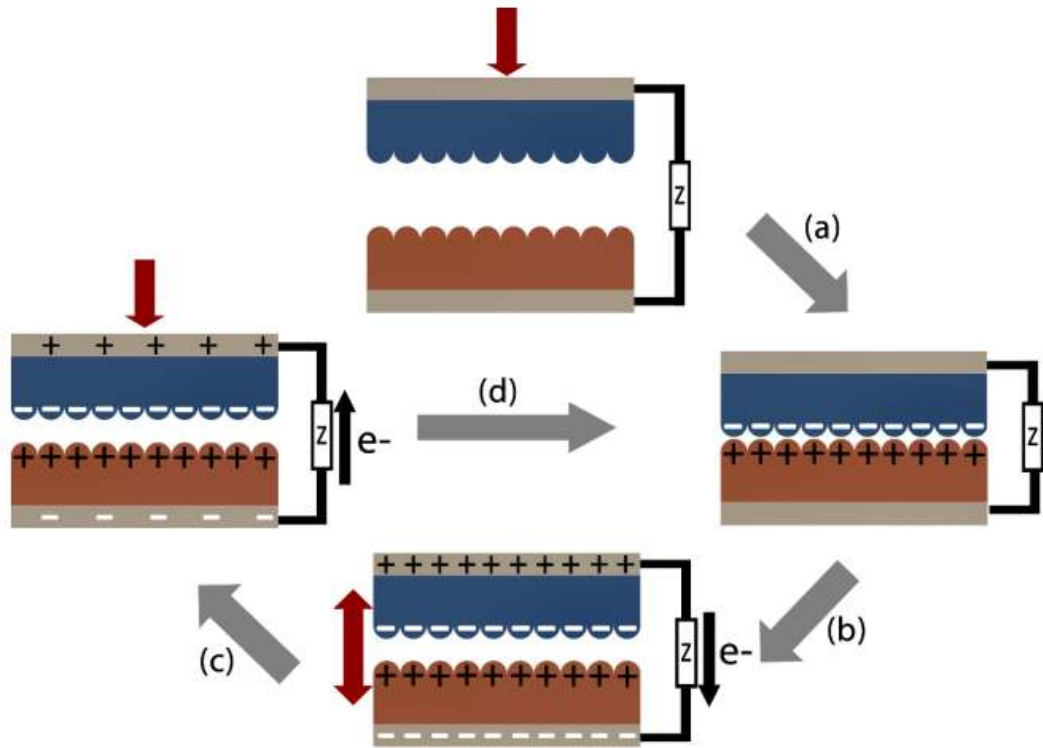


Şekil 2.2. TENG çalışma modlarının şemaları. (a) Temas ayırma modu. (b) Kayar mod. (c) Tek elektrot modu. (d) Serbest duran triboelektrik katman modu

2.6.1. Temas Ayırma Modu

İlk temel triboelektrik nanogeneratör modu, TENG katmanının bir sandviç yapı olarak üretildiği dikey temas ayırmadır [64]. Dikey temas ayırma modunun çalışma mekanizması Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Bu modda, TENG'in önceden ayrılmış dielektrikleri harici bir mekanik kuvvet tarafından temas ettirildiğinde, dielektriklerin yüzeyinde bir triboelektrik yük üretilir. Katmanların küçük bir boşlukla ayrılmasıyla, yalıtkanın dışına bağlanan iki düzlemsel elektrot arasında bir elektrostatik potansiyel farkı gelişir. Elektrotlar bir yüke bağlandığında, elektrostatik alanı dengelemek için negatif yüklü dielektrik yakınındaki elektrota serbest elektronlar akar. Buna genellikle elektrostatik indüksiyon denir. Sonunda, tekrarlanan temas ve ayırma adımları, harici elektrik yükü yoluyla alternatif bir akım üretir. Bu frekans, temas ve ayrılma döngüleri tarafından üretilir. Daha önce de belirtildiği gibi, triboelektrik yükler sadece yalıtkan-yalıtkan kontakları arasında değil, aynı zamanda yalıtkan-iletken kontakları arasında da üretilir. Bu nedenle, dikey temas ayırma modu, bir çift dielektrik katman [65] veya bir dielektrik iletken katman [66] ile oluşturulabilir.

Dikey temas ayırma modu, sandviç yapıdaki dielektrik katmanlar, elektrotlar ve bir izolasyon boşluğundan oluşan TENG'in en basit tasarımıdır. Polimerler, özellikle triboelektrik serinin en alt kısmına yerleştirilen Teflon (PTFE) olmak üzere harici triboelektrifikasyon özelliklerinden dolayı çoğunlukla dielektrik katmanlar olarak kullanılan bileşenlerdir (Tablo 1). Fakat son yıllarda triboelektrik yük kaynağı olarak kalkojenitler [65], inorganik maddeler [67] ve sıvılar [68] da triboelektrik kaynaklar olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Temas ayırma modunun çalışma mekanizması

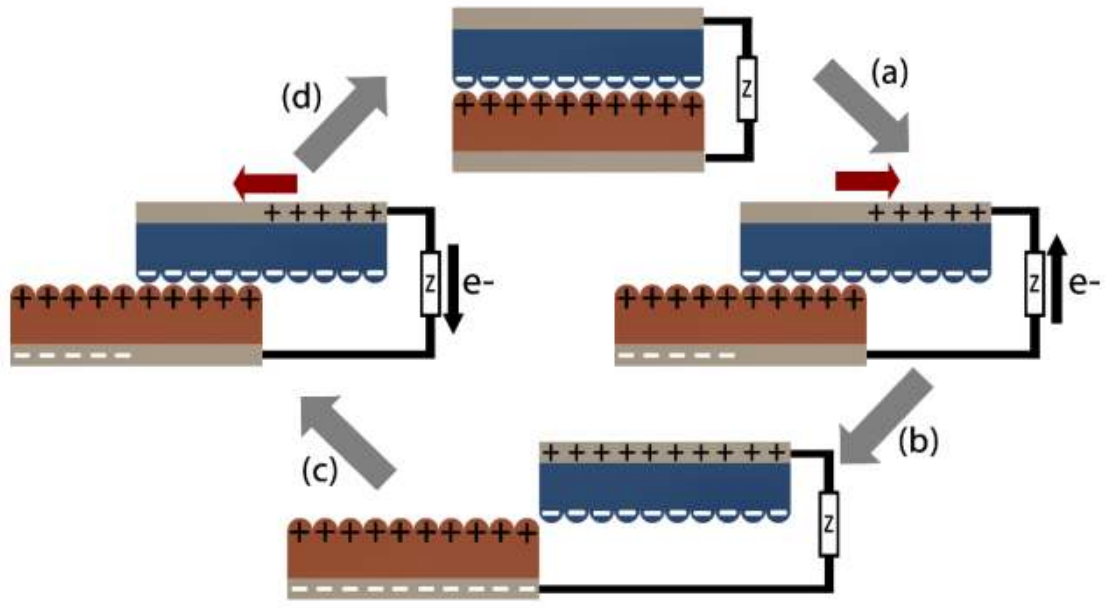
Şekil 2.3’de temas ayırma modunun çalışma mekanizması şemalandırılmıştır. Dış kuvvet iki yalıtkanı temas ettirdiği ve yüzeylerde triboelektrik yük oluşumuna neden olduğu presleme adımı gerçekleştirildiğinde (Şekil 2.3(a)), serbest bırakma adımı elektrotlar arasında indüklenen elektron akışına yol açar (Şekil 2.3 (b)). Daha sonra dış kuvvet tarafından yeniden bastırma, potansiyel fark varyasyonu nedeniyle elektron geri akışına yol açar (Şekil 2.3 (c)) ve elektron akışının dengeye ulaştığı yakın temas aşaması yeniden kurulur (Şekil 2.3 (d)).

TENG'in genel mekanizmasında serbest elektron kaynakları olarak hareket eden elektrotlar, dielektrik malzemenin dış yüzeyine çeşitli şekillerde dahil edilebilir. Biriktirme ve kaplama, dielektrik ile en sıkı entegrasyonu sağlayan etkili tekniklerdir ve bir elektrot olarak alüminyum bant da kullanılabilir. Ayırma boşluğu, genellikle yaylar tarafından sürdürülen temasla ayrılmış TENG modunun çalışma mekanizmasında çok önemli bir rol oynar, bu da preslemeden sonra kendi kendini serbest bırakmaya izin verir [66]. Ek olarak, kavisli yapı, ayırma boşluğu için eşzamanlı serbest bırakma sağlamak için de kullanılır [64]. Ayrıca, dikey temas ayırma moduna dayalı çok katmanlı TENG'ler, 3D baskılı destekler yardımıyla veya TENG birimlerinin çoğunun birbirlerini kenarlarından tutturulduğu zikzak formda birkaç TENG yapısının paketlenmesiyle oluşturulur [69].

2.6.2. Kayan Mod

Kayma modunda, triboelektrik katmanlar Şekil 2.4'de gösterildiği gibi tam temas durumunda inşa edilmiştir. Önceki moddaki dikey temaslardan farklı olarak, burada yanal kayma, triboelektrik yüklerin üretilmesine yol açar. Bu nedenle, triboelektrifikasyon sadece yüzeylerin hizalanmış enine kesitlerinde meydana gelir. Kayar mod çalışma mekanizması ile ilgili olarak, başlangıçta, ayırma boşluğunun olmaması sebebiyle potansiyel bir düşüş olmayacaktır. Bir kez, yüzeylerin yanal ayrılması dış kuvvet tarafından yönlendirilir, yüzeyler ve dolayısıyla yükler de elektrostatik potansiyel farkıyla ayrılır. Yüzeyin yanal ayrılması bir dış kuvvet tarafından yönlendirilmesiyle, yüzey ve yük de elektrostatik potansiyel farkı ile ayrılır. Dikey temas ayırma moduna benzer şekilde, başlangıçtaki elektrostatik potansiyel düşüşünü dengelemek için elektrotlar arasında bir harici yük direnci yoluyla indüklenmiş bir akım akar.

Şekil 2.4'de kaydırma modunun çalışma mekanizması şemalandırılmıştır. Başlangıçta, dış kuvvet yoluyla yanal kayma, indüklenmiş elektron akışı başlar (Şekil 2.4(a)), yalıtkanların tamamen ayrılması, elektron akışı doygunluğu ile sonuçlanır (Şekil 2.4(b)). Geriye doğru kayma, elektrostatik potansiyel düşüşünü dengelemek için elektron geri akışı sağlar (Şekil 2.4(c)). Böylece elektrostatik potansiyel farkının sıfır olduğu tam temas adımı (Şekil 2.4(d)) gerçekleştirilmiş olur.

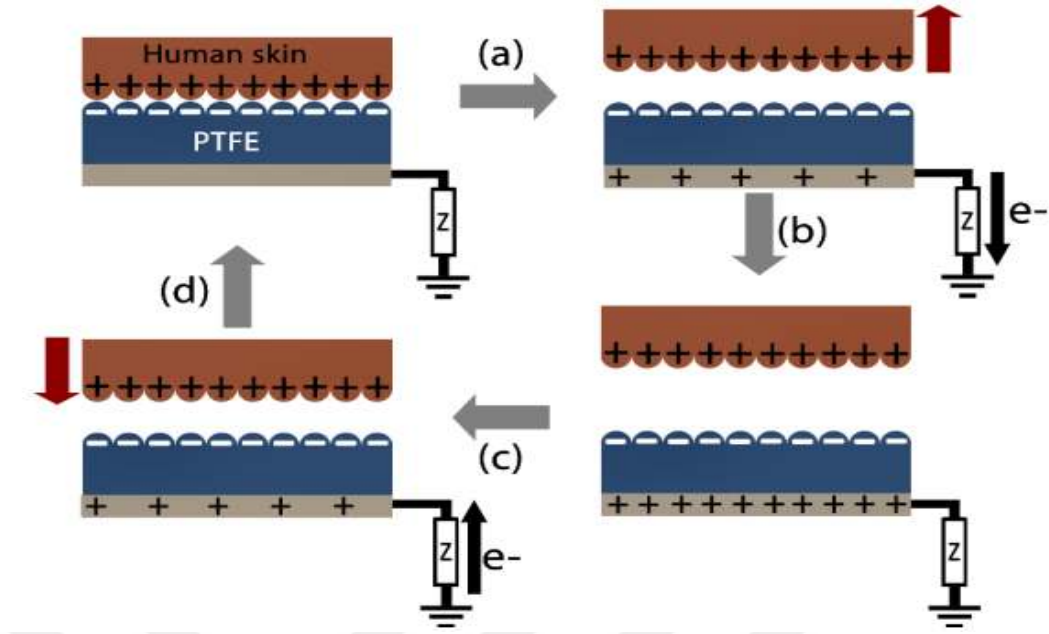


Şekil 2.4. Kaydırma modunun çalışma mekanizması

Kayma modunda, temas alanının en azından hareketin başlangıcında ve sonunda azaltıldığı iddia edilebilir, ancak deneyler bunun tersini iddia eder, çünkü kayma düz temasa göre daha fazla triboelektrik yük üretimi sağlar [70]. Kayma modunun diğer bir avantajı da düzlemsel [71], dairesel [72-73] ve dönüşlü [74] gibi çeşitli hareket türlerine en yüksek esneklikte uygun olmasıdır.

2.6.3. Tek Elektrot Modu

Daha önce tanıtıldığı gibi, triboelektrifikasyon doğadaki tüm mekanik temasların kaçınılmaz bir olgusudur ve TENG'ler sadece bu gerçeği kullanarak enerji toplama yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, yukarıda bahsedilen iki mod, yalnızca katı ve kompakt tasarlanmış bir cihaz içindeki dielektrikler tarafından sürdürülen triboelektrifikasyona odaklanır ve ortamdaki triboelektrik yüklerin kullanılmasını imkânsız kılar. Tek elektrot moduna örnek olarak insan derisi [75], lastikler [76] ve yağmur damlası [77] gibi çevrede keyfi triboelektrik yük kaynaklarını serbestçe hareket ettirerek enerji toplanması şemalandırılmıştır.



Şekil 2.5. Tek elektrot modunun çalışma mekanizması

Şekil 2.5’de tek elektrot modunun çalışma mekanizması verilmiştir. Bu çalışma sisteminde, insan derisinin teması ve ayrılması, dış yük üzerinden elektron akışı sağlayan elektrostatik potansiyel farkı oluşturur (Şekil 2.5(a)), kritik ayırma sağlandığında sistem dengeye gelir (Şekil 2.5(b)). İnsan derisi PTFE tabakasına yaklaşırken, elektronların geri akışına neden olan elektrostatik potansiyel düşüşü ortaya çıkar (Şekil 2.5(c)) ve elektron akışının dengeye ulaştığı tam temas koşulu yeniden oluşturulur (Şekil 2.5(d)).

Tek elektrot modu TENG ile enerji hasadı, serbest hareket eden bir çift dielektrik kaynakla donatılabilir veya tek bir elektrot ya da bir dielektrik katmana bağlı bir elektrot sabitlenebilir.[78]. Dielektrik katman bağlı elektrot yapısı durumunda Şekil 2.5’de gösterilmektedir. İsteğe bağlı dielektrik kaynağı olarak kabul edilen insan derisi, polyesterin dış yüzeyi toprağa bağlıyken elektrotların yerleştirildiği sabit bir politetrafloroetilen (PTFE) tabakası ile temas halindedir. Dielektrikler arasında dikey veya kayan temas yapıldığında, yüzeyde zıt kutuplara sahip triboelektrik yükler üretilir. İnsan derisinin ayrılması sonucunda, bir elektrik alan farkı oluşturarak, elektrik alanındaki değişim dengelenene kadar elektronların topraktan elektrota serbestçe akmasına neden olarak elektrot üzerinde pozitif bir yük oluşturur. Ardından, PTFE aracılığıyla insan derisine yeniden yaklaşmak, elektrik alanı aşınarak elektronların topraktan elektrota geri akışına neden olacaktır.

Nihayetinde, insan derisinin sabit polyester tabakasına tekrar tekrar dokunması ve yaprakları elektrot ile toprak arasındaki harici bir yük tarafından yönlendirilebilen elektrik üretecektir.

Tek elektrot modu ile çift elektrot sistemi karşılaştırıldığında, tek elektrot modunun verimliliği diğer modlardan daha düşüktür çünkü elektrostatik indüksiyon işlemi tarafından üretilen yük miktarını sınırlayacak ikinci bir elektrot yoktur [79].

2.6.4. Bağımsız Triboelektrik Katman Modu

Serbest duran triboelektrik katman modu TENG'ler, tek elektrot sistemlerine benzer şekilde inşa edilmiştir, tek fark mevcut olanın yanına en az bir veya daha fazla sabit triboelektrik katman yerleştirmektir [80]. Bu modun çalışma mekanizması ile ilgili olarak, isteğe bağlı bağımsız bir triboelektrik kaynağı, belirli bir aralık mesafesi boyunca ayrılmış sabit triboelektrik katmanlarla temas eder. Bir kez, dikey veya yanal hareketler, düzensiz triboelektrik yük dağılımı boyunca üç dielektrik arasındaki temas ve ayırma adımlarını ilerletir, böylece elektrostatik potansiyel farkını artırır. İndüklenen elektronlar böylece elektrotlar arasında akan akımın oluşmasına yol açacaktır.

Serbest duran bir triboelektrik katman tasarımında hem yalıtkanlar hem de iletkenler mekanik temas altında triboelektrik yük üretimi oluşturduğundan dolayı sabit katmanlar ya elektrot bağlı dielektrikler ya da dielektrik içermeyen basit elektrotlar içerebilir [81]. Ek olarak, sabit triboelektrik katmanlar iki konfigürasyona göre düzenlenebilir; sabitlenmiş katmanların serbest duran katmanın altında olduğu yan yana konum [82] veya serbest duran triboelektrik katmanın sabit katmanlar arasında konumlandığı dikey olarak çok katmanlı konum [83]. Bu modun önemli bir avantajı da titreşimlerden, büyük ölçekli hareketlerden [84] ve tekstil platformlarından [85] enerji toplayabilmesidir.

2.7. TENG Uygulamaları

TENG'ler incelendiği bu çalışmada malzeme geliştirme esas alınmıştır. Bu önem, TENG'lerin performansının artırılmasında kullanılan TE malzemelerin özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Daha spesifik özellikler elde etmek için, bileşenlerinin özelliklerini birleştiren kompozitler geliştirilmiştir.

Google Akademik'e göre, TENG'lerle ilgili yayımlanmış makalelerin %55'i kompozitleri kullanmış veya kompozitlerden bahsetmektedir. Bu sayı, kompozitler yerine nano kompozitler anahtar kelimesiyle arama yapıldığında %34,5 olarak verilmektedir. Kompozitlerin önemi, yeni dielektrik özellikler, daha iyi mekanik mukavemet, gelişmiş yük afiniteleri sergileyebilmeleridir. Bu nedenle TENG çalışmalarında yeni kompozitlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada nano kompozitlerin üretimi, nano kompozitlerin tipleri ve TENG çalışmalarında uygulamaları gözden geçirilmiştir. Böylece nano kompozitlerin, TENG'lerin performansını nasıl artırdığına dair genel bir bakış açısı sunulmakta ve gelecekteki çalışmalara rehberlik edilmektedir [86].

Yapılan bir çalışmada PAN/ZnO ve PAN/B(OH)₃ TE temas tabakası olarak esnek nanofiberler ile PAN güç üretim performansını artırmak üretilmiştir. Deneylerde, PAN/ZnO ve PAN/B(OH)₃ tribo-pozitif dielektrik olarak kullanılmıştır. Diğer yandan TENG'lerin tribo-negatif dielektriğin için polivinilbütiral (PVB) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar TENG'lerin güç yoğunluğunun dielektrik malzeme boyutları ve yük koşulları ile değiştiğini göstermiştir. $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 'lik deneysel çalışmada yük $33 \text{ M}\Omega$ olduğunda en yüksek güç yoğunluğu PAN/B(OH)₃ 6.67 Wm^{-2} 'a olarak bulunmuştur. Çözelti bazlı sentezlenmiş ZnO sınırlı kristalliğe sahip olduğundan, PAN'ın güç üretim performansı üzerinde olumlu bir etki gözlenmemiştir. Araştırmacılar yeni TENG'lerin tasarımına uygun olarak geliştirilen kolay ve düşük maliyetli üretim yönteminin, yüksek performanslı TENG'lerin geliştirilmesi için yeni bir yol gösterdiğinin belirtmişlerdir. Ayrıca imal edilmiş PAN bazlı nanofiber yapıların, gelişmiş TE teknolojisinin geliştirilmesi için faydalı olabileceğini belirtmişlerdir [5].

Diğer bir çalışmada TENG'lerin düzenli veya kontrollü çalışması için mekanik enerji dönüşüm sistemleri araştırılmıştır. Bunu yapabilmek için kinematik veya titreşim teorisini kullanmışlardır. TENG'lerin mekanik çalışmasını kontrol ettikten sonra, bu cihazlardan güç üretimini tahmin edilebileceği ayrıca, mekanik frekans eşleştirme, elektrik devrelerinden kaynaklanan güç kaybını büyük ölçüde azaltılabileceği belirtilmiştir. Rotasyonel (Döner) hareketten doğrusal harekete hareket kontrolü, temas-ayırma modunda TENG'lerin yüksek frekansla çalışmasını sağlayarak sürdürülebilir ve yüksek performanslı TENG'ler elde edilebileceği vurgulanmaktadır.

Diğer yandan TENG'ler için rezonans sistemi tasarımlarının maksimum çıkış gücü üretebileceği belirtilmiş ve bu nedenle, TENG'lerle rezonans sistemi tasarlanırken sönümleme etkilerinin veya doğrusal olmayan etkilerin nasıl giderilebileceği açıklanmıştır. Son olarak, TENG'ler için düzensiz mekanik giriş kaynaklarının boşa harcanmasını önlemek amacıyla etkili bir yol sundukları ve TENG'lerin pratik olarak ticari alanlarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir [87].

Araştırmacılar başka bir çalışmada güç dönüşüm verimliliğinin (GDV) iyileştirilmesi için TENG'lerin kinematik tasarımını açıklamışlardır. Daha yüksek çalışma frekansına sahip TENG'lerin çıkış enerjisi geliştirilebilir, böylece gelişmiş GDV sağlanabilir. Dişli sistemli olarak gerçekleştirilen TENG sisteminin çıkış performansı, dişli oranını (1, 1,7 ve 5) kontrol ederek 1,5, 3 ve 4,5 Hz giriş frekansları altında araştırılmıştır. Giriş frekansları altında, TENG'den elde edilen çıkış voltajı ve akımı sırasıyla maksimum 3,6 kat ve 4,4 kata kadar artırılmıştır. GDV'nin 1,5 Hz giriş frekansı altında 5 dişli oranında 7.57 kata kadar artırıldığı belirtilmiştir. Dişli tabanlı TENG sistemi çıkış voltajı düzenlenerek bir kondansatörün şarj işlemi gerçekleştirilmiştir. 4.5 Hz giriş frekansı altında, 5 dişli oranında 3 kat daha gelişmiş bir düzeltme voltajı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dişli tabanlı TENG sistemi, çıkış gücünün büyüklüğünü ve süresini aynı anda iyileştirebileceği ve çıkış enerjisini artırabileceği belirtilmiştir. Böylece geliştirilen dişli tabanlı TENG sisteminin belirli bir giriş enerjisinde çalışan TENG'lerin GDV'sini artırdığı vurgulanmıştır [88].

TENG, hibrit enerji uygulamalarında yağmurdan elde edilen mekanik enerjinin elektriğe dönüştürülmesi için kullanılabilecek gelişmekte olan bir teknolojidir. Bununla birlikte, yüksek performanslı bir TENG henüz elde edilmemiştir. Bu çalışmada, mekanik-elektrik enerjisi dönüşüm süreci hakkındaki anlayışımızı önemli ölçüde geliştiren kinetik enerji hesaplama ve akım entegrasyonu (KEHAE) yöntemi kullanılmış ve nicel bir analiz yöntemi sunulmuştur. KEHAE yöntemine dayanarak, 1,25 mA kısa devre akımı (I_{sc}), 150 V açık devre voltajı (V_{oc}) ve %24,89'lük yüksek enerji dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Ayrıca, enerji dönüşüm verimliliğinden daha fazla yararlanmak için yağmur damlalarının kinetik enerjisini sürekli toplayan çok katmanlı bir TENG önerilmiştir. Son olarak, çok katmanlı TENG'ler doğal fotovoltailerle entegre edilerek tüm hava koşullarında enerji hasadı sağlanmaktadır.

Böylece TENG'in daha yüksek performanslara doğru geliştirilmesi sağlanmış ve tüm hava koşullarında hibrit TENG sistemlerinin ticarileştirilmesini teşvik edecek teorik bir sistem sunulmuştur [89].

Esnek elektronikte yaşanan son gelişmeler, elektronik skin (E-skin) gibi yeni nesil giyilebilir cihazlara büyük avantajlar getirmiştir. Bununla birlikte, güç sorunu hala E-skin için boyut, ağırlık ve maliyeti sınırlamaktadır. Burada, epidermal elektronikte trambolinden ilham alan mekanik tasarım ve işleme teknikleri, E-cilt için TE etkiye dayanan ince, yumuşak, giyilebilir kendi kendine çalışan dokunsal sensörler geliştirmek üzere bir araya getirilmiştir. Modifiye edilen mikro yapının yardımıyla, TENG sensörü büyük ölçüde geliştirilmiş elektrik performansı sergilemekte ve 0,367 Pa'lık büyük bir hassasiyetle geniş bir basınç aralığını sunmaktadır. Ortaya çıkan TENG sensörü, %35'e kadar yüksek seviyeli bir gerilim altında bile doğru ve değişmeyen sinyal çıkışlarıyla mükemmel gerilebilirlik ve algılama stabilitesi sergilemiştir. Bu çalışmada insan-makine ara yüzleri için bir eldiven entegrasyonu ile ilişkili sensörler ile basınç haritalama ve temas nesnelerinin tanınması için 4×4 dokunsal bir dizin geliştirilmiştir [90].

Lee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada çinko oksit film kullanarak bir TENG üretmişlerdir. Çalışmada katman olarak çinko oksit film (ZnO), çinko oksit/poli (3-hekziltiyofen-2,5 diyl) (ZnO/P3HT) ve çinko oksit/[6,6]-fenil-C61-bütirik asit metil ester-poli (3-hekziltiyofen-2,5 diyl) (ZnO/P3HT-PCBM) olarak 3 farklı tasarım

kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda çinko oksit TENG'den elde edilen gerilim 0.05 V iken bu değer çinko oksit/poli (3-hekziltiyofen-2,5 diyl) TENG'de 0.2V'a kadar yükselmiştir. Çinko oksit/ [6,6]-fenil-C61-bütirik asit metil ester-poli (3-hekziltiyofen-2,5 diyl) TENG'de ise enerji dönüşüm verimliliği 0,5 V olarak tespit edilmiştir. Böylece çıkış potansiyeli %28 yükselmiş farklı bir ifadeyle 36 kat artmıştır [91].

Wang ve arkadaşları daha önce pek çok kez denenmiş olan TENG-süperkapasitör (SK) sistemlerine bir yenisini eklemiş ve yenilikçi bir tasarım sunmuşlardır. Önerdikleri sistemde, SK'nın alt elektrotuna bir TE elektrot ilave edilerek kaplanmıştır. Bu tasarımda 3 elektrot paralel olarak bağlanırken dördüncü elektrot sonlandırıcı olarak konulmuştur. Kapton filmler ile bağlantılar gerçekleştirilmiştir. Böylece temastan elde edilen yükün direkt olarak SK'larda toplanması hedeflenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre sistemin 10 Hz'lik frekansta çalışmasında çıkışta 28 V'a kadar yük üretilmiş; SK kısmında ise 40 V'a kadar yükleme alınmıştır [92].

Bir başka çalışmada piezoelektrik filmlerin birbirine bağlanmasında kullanılan elektrotların yerine iletken polimerler seçilmiştir. Bu çalışmanın özgün yanını oluşturan iletken katı katkılı düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) filmler ile fiber çekme metodu gerçekleştirilmiştir. Bu metot da karbon siyahı katkılı LDPE elektrotlar ile farklı piezoelektrik katmanlar üst üste konulup bükülmüş ve fiber şekline getirilmiştir. Piezoelektrik filmler için ise PVDF matris içinde BaTiO₃, PZT (piezoelektrik katman 1) veya karbon nanotüp (CNT) (piezoelektrik katman 2) dağıtılmıştır. Üst üste getirilen filmlerin sıcaklıkta yumuşaması sağlanarak, polikarbonat bir eksen etrafında bir yöne doğru bükülmüştür. Elde edilen sonuçlarda bu fiberlerle dokunan kumaşın, kol katlama ve salma hareketleriyle yaklaşık 5 V'a kadar güç ürettiği belirlenmiştir [93].

Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yüksek elektronegativitesinden ötürü PVDF nanofiber katmanı, TE elektrot olarak kullanmışlardır. Pozitif TE katmanı olarak ise nikel ve bakır kaplı PET kumaşları tercih ettikleri görülmektedir. Çalışmada öncelikle bükülmüş iletken kumaş elektrot ile birlikte poli (viniliden florür) nanofiberin bir parçası, normal bir ayakkabı tabanı olarak bezin önüne dikilmiştir. Ardından aynı ebatta bir taban şeklinde elastik bir sünger poli (viniliden florür) nanofiberlerin üzerindeki kumaşın

önündeki oyuklu bölgelere dikilmiştir. Diğer yüz kısmına ise elektrod olarak iletken kaplı bir kumaş dikilmiştir. Tasarlanan TENG ayakkabı tabanı ile 210 V'a kadar güç üretimi sağlanmıştır. Bu durum cihazın aynı anda seri olarak bağlı 214 LED lambayı yakabileceğini göstermektedir [42].

Bir diğer çalışmada, dimetil formamid içerisine farklı seviyelerde grafen ilave ederek (%0-0,1-1,0-3,0-5,0) poli (viniliden florür) solüsyonlar oluşturulmuştur. Bu solüsyonlardan Elektro eğirme cihazı ile bu solüsyonlardan elde edilen nanofiberler, iki metal elektrod arasında sandviç şekline getirilerek TENG üretilmiştir. Yapılan TENG ölçümlerinde katkısız poli (viniliden florür) ile üretilmiş cihazla normal cihaz arasında 2 kat voltaj farkı elde edilmiştir [94].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzeme Üretimi

TENG'in icadından bu yana dielektrik tabakaları üretmek için birçok malzeme kullanılmıştır. Bunun nedeni, metallere, ahşaba ve seramiğe kadar hemen hemen tüm malzemelerin triboelektrik etkiye sahip olmasıdır. İsteğe bağlı birçok triboelektrik malzeme çifti vardır, ancak tüm çiftler yüksek güç sağlayamaz. Bu nedenle temas yoluyla elektronları kabul etme veya verme özelliklerine göre sıralanmış çok sayıda malzemeden oluşan bir triboelektrik seri oluşturulmuştur. Bu seri, triboelektrik malzeme seçimi söz konusu olduğunda araştırmacıların TENG'in yüksek güç çıkışını elde etmesine yardımcı olur. İki farklı malzemenin triboelektrik serisi birbirinden ne kadar uzaksa, temas yükü o kadar güçlü olacaktır. Ancak listede birbirine yakın aralıklı seçilen malzemelerin de temasının bir sonucu olarak, çok az yüklenme olabilir veya hiç yüklenme olmayabilir. Sonuç olarak, seçilen malzemeler TENG'lerin performansını önemli ölçüde belirlediği için, araştırmacıları yeni TENG malzemeleri üretimine veya mevcut malzemelerin geliştirilmesine yönlendirmektedir.

Bu çalışmada, TENG'lerin çıkış performansını iyileştirmek ve daha yüksek güç yoğunluğu elde etmek için sırasıyla negatif ve pozitif dielektrik katmanlar olarak PAN ve karpit/PVP esnek nanofiberleri üretilmesi amaçlanmıştır. Tribo-negatif elektrot olarak karpit/PVP polimeri kullanılacaktır. Polimerler çeşitli işlemlerle yüksek yüzey alanlı nano malzemeler oluşturma yeteneğine sahiptir. Kolay işleme ve düşük maliyet, bu tür polimerleri giyilebilir elektronikler için neredeyse vazgeçilmez kılmaktadır. Ayrıca polimerler esnek malzemelerdir ve metal oksitlere ve metallere göre işlenmesi daha kolaydır, ancak daha düşük tribo-pozitif etkilere sahiptir. Bu tür triboelektrik malzemeler üzerinde triboelektrik yüklerin oluşmasında kimyasal yapıları önemli ölçüde etkilidir. Bu bağlamda, triboelektrik nanofiberlerin elektron çekimlerinin çeşitli takviye türleri ile artırılması önemli avantaj sağlamaktadır. Polimer malzemeleri direkt kullanmak yerine, fiziksel temas alanını ve bazı durumlarda tribo-potansiyeli iyileştirmek için polimer yüzeylere mikro/nano model tabanlı kare, piramit ve yarım küre oluşumları uygulanabilir.

Pozitif ve negatif dielektrik katmanlar, elektrospin işlemi ile ayrı ayrı imal edildi. İlk olarak 500 mg PAN 15 mL DMF içinde istenilen viskozite yoğunluğuna ulaşmak için 1 saat karıştırılarak negatif tabaka solüsyonu hazırlandı. Daha sonra karpit tozu PVP çözeltisi üzerine ağırlıkça %0, 1, 2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında ayrı ayrı ilave edilerek 16 saat karıştırıldı. Böylece dielektrik malzemelerin üretimi için birer nanofiber çözeltisi hazırlanmış oldu. Çözelti daha sonra 21 gauge metal iğne ucu kullanılarak bir şırıngaya aktarıldı. Enjektör mevcut sisteme yerleştirildi ve toplayıcı ile iğne ucu arasındaki mesafe 15 cm olarak ayarlandı. Bu esnada toplayıcı olarak iğnenin önüne alüminyum folyo yerleştirildi. Şırıngadaki çözeltinin akış hızı nanofiber üretimi için 1 ml/saat olarak ayarlandı. Aynı zamanda çözelti bu hızda akarken iğne ile toplayıcı arasına 20 kV'luk bir voltaj uygulandı. Bu, çözücünün buharlaşmasına ve polimerin karşı toplayıcı üzerinde nanofiberler olarak toplanmasını sağladı. Bu şekilde üretilen bütün nanofiberler alüminyum folyo üzerine toplandı. Son olarak, sırasıyla negatif ve pozitif dielektrik malzemeler olarak PAN nanofiberleri ve karpit/PVP nanofiberleri elde edildi.

3.2. Triboelektrik Nanogeneratör İmalatı

Bu çalışmada, dikey temas ayırma modlu TENG kullanıldı. TENG üretimi için dış katman olarak uygun fiyatlı, hafif, erişilebilir, kırılmaz ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip pleksiglas oldukça uygundur. Dış katman için 2 adet 9 cm x 9 cm ölçüsünde pleksiglas malzeme kullanıldı. Kullanılan pleksiglas malzemelere merkezden 8 mm ve yanlardan 2 mm çap ölçülerinde delikler açıldı. Yanlarda açılan deliklere elektrot şeklinde kullanılacak kablo lehimlendi. TENG'in işleme sırasında kaymasını önlemek için, 7 mm çapında dört mil ile sabitlenen milleri yerleştirmek için üst ve alt pleksiglas katmanlarının dört köşesi delindi. Alt ve üst katmana, matkap ile toplamda 4 adet olacak şekilde her bir köşeye 1 adet delik açıldı ve çelik yaylar monte edildi. Alt pleksiglas tabakasına tribo-negatif katman olarak PAN, üst tabakaya tribo-pozitif bir katman olarak farklı yüzdelerde karpit katkılı PVP nanofiberleri yerleştirildi. Bu esnada, malzemelerin iletken tabakası olan alüminyum folyo ile elektrotların teması sağlandı. Mekanik dayanımı arttırmak ve kararlı bir tabaka elde etmek için nanofiberler sıcak preslemeye tabi tutuldu. Karpit, triboelektrik özellikleri iyileştirmek amacıyla farklı seviyelerde (ağırlıkça %1, 2.5, 5, 7.5 ve 10) PVP solüsyonlarına katkılı.

3.3. Malzeme Karakterizasyonu

Bütün nanofiber üretimleri için elektrospın yöntemi kullanıldı. Elektrospın cihazında Kd Scientific markalı şırınga pompası kullanıldı. Polivinilpirolidon (PVP, $M_w = 1300,000$), karpit, poliakrilonitril (PAN, $M_w = 150,000$) Sigma Aldrich'ten temin edildi. Gerilim ölçümü, 10 M Ω dahili dirençli (Rin) Rigol DS4014 osiloskop ile yapıldı. Dielektrik yüzeylerin morfolojisini ve yapısını karakterize etmek için SEM (JEOL 6510) mikroskobu kullanıldı. Üretilen nanofiberlerde karpit yapısını ve varlığını doğrulamak için SEM mikroskobu kullanılarak EDX ve elemental harita analizleri yapıldı. Numune yüzey topografyasının görüntüleri alınmak için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) cihazı kullanıldı.

3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

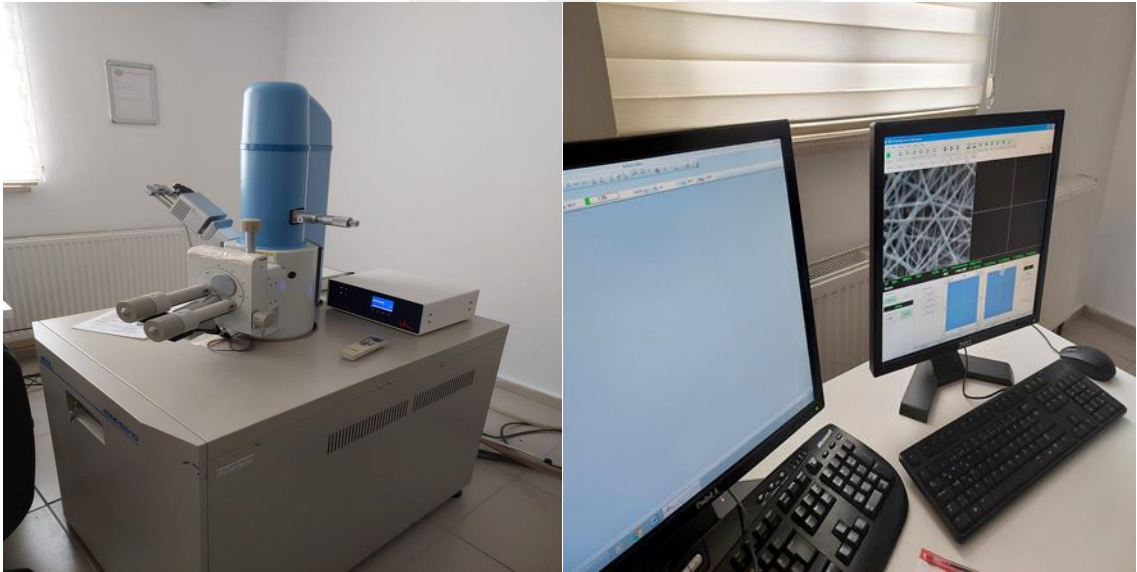
Stereo mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM); malzemedan yansıyan ışınları kullanarak büyütölmüş görüntü oluştururlar. Malzeme yüzeyindeki pürüzlölüklerin ve çatlakların incelenmesi açısından kullanılan bir yöntemdir.

SEM'de, katı bir malzemenin yüzeyinde farklı sinyaller oluşturmak için odaklanmış yüksek enerjide elektron demeti kullanılır. Elektron numunesi etkileşiminden kaynaklanan sinyal, numuneyi oluşturan malzemelerin kimyasal bileşimi, dış morfolojisi (doku) ve kristal yapısı gibi özellikleri hakkında bilgi verir. Birçok uygulamada, bu özelliklerin uzamsal varyasyonunu gösteren 2D görüntüler oluşturmak için numune yüzeyinde seçilen bölgelerde veriler toplanır. Geleneksel SEM teknikleri kullanılarak (20X'ten ~30.000X'e büyütme ve 50'den 100 nm'ye varan uzaysal çözünürlükler), genişliği ~1 cm'den 5 mikrona kadar değişen bölgeler tarama modunda görüntölünebilir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM); numune üzerisin de seçilen nokta konumlarının analizini de yapabilir; bu yaklaşım, kimyasal bileşimin, kristal yapının ve kristal yönünün niteliksel veya yarı niceliksel olarak belirlenmesi için özellikle yararlıdır. Bir SEM'de kinetik enerji taşıyan hızlandırılmış elektronlar bulunur. Aktarılan kinetik enerji, gelen elektron katı numune içinde yavaşlarken, elektron-numune etkileşimi doğrultusunda üretilmiş farklı sinyaller olarak dağıtılır.

Sinyaller arasında ikincil elektronlar (SEM görüntüleri meydana getiren), kırınımlı geri saçılmış elektronlar, geri saçılmış elektronlar (BSE), fotonlar (temel analiz amacıyla kullanılan sürekli ve karakteristik X-ışınları), görünür ışık ve ısı bulunur.

Numune görüntülemek için yaygın olarak; geri saçılan elektronlar ve ikincil elektronlar kullanılır. X-ışınlarının oluşumu, gelen elektronların numunedeki atomların ayırık yörüngelerindeki (kabuklardaki) elektronlarla elastik olmayan çarpışmalarıyla üretilir. Uyarılmış elektronlar, daha az bir enerji durumuna döndüklerinde, sabit dalga boyuna sahip X-ışınları yayarlar. Bu şekilde, elektron ışınından "uyarılan" mineralin her bir elementi için karakteristik bir X-ışını üretilir. SEM (Stereo mikroskop) analizi "tahribatsız" olarak kabul edilir. Yani, elektron etkileşimi dolayısıyla oluşan X-ışınları numune de hacim kaybına neden olmamakta ve bu sebeple aynı numune yeniden analiz edilebilmektedir.



Şekil 3. 1. Bu çalışmada kullanılan JEOL 6510 model SEM

Bu nedenle seçilen polimer malzemelerin yüzey morfolojileri ve saflık ile homojenlik oranları hakkında bilgi edinebilmek için SEM analizinden faydalanıldı.

Tüm SEM cihazlarının temel bileşenleri; elektron lensleri, bir elektron kaynağı, ilgilenilen tüm sinyaller için detektörler ve görüntüleme/veri çıkış cihazları ile numune aşamasıdır. Altyapı gereksinimleri: vakum sistemi, titreşimsiz zemin, güç kaynağı,

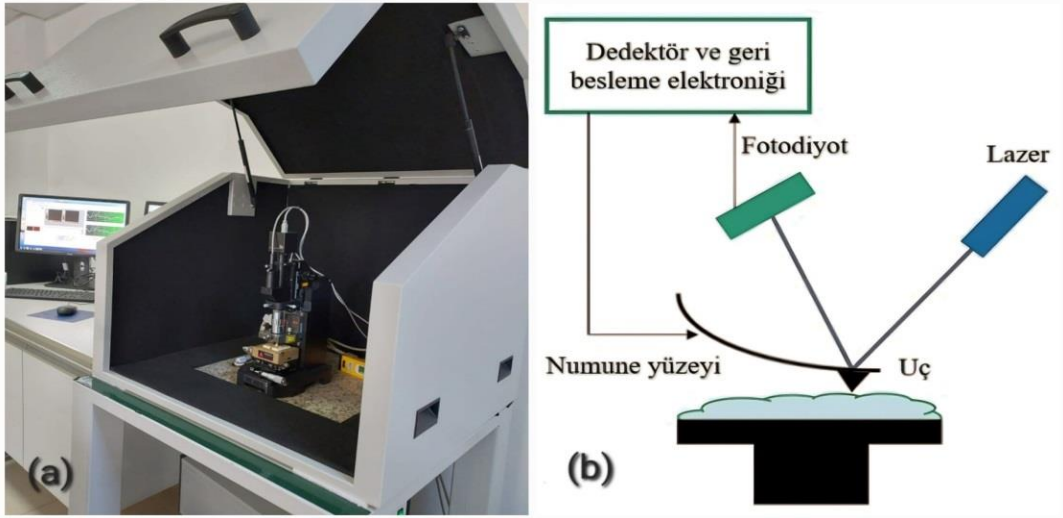
soğutma sistemi, elektrik ve ortamda manyetik alanlarından arındırılmış odadır. Bir SEM'de mutlaka en az bir adet detektör bulunur ve çoğunun ilave detektörleri vardır. Kullanılan herhangi cihazın spesifik işlevselliği, içinde barındırdığı detektörlere önemli ölçüde bağlıdır.

Bu tez çalışmasında Bingöl Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL 6510 model SEM kullanılmıştır.

3.3.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), ana görevleri manyetizma, yükseklik ve sürtünme gibi özelliklerin ölçülmesini içeren bir taramalı prob mikroskobu türüdür. Ölçüm yapmak ve veri toplamak amacıyla kullanmak için probun yerleştirildiği yüzeye dokunulmalıdır. Temelde piezoelektrik teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş, düşük profilli ve lazer optimizasyonuna dayalı bir ölçüm sistemidir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), atomları gözlemlemek için nano ölçekli numunelerin incelenmiş yüzeyini kullanarak moleküller arası kuvvetleri ölçme prensibiyle çalışır. İşlevselliği, yüzey tanıma, algılama ve görüntüleme dahil olmak üzere üç ana çalışma prensibi ile sağlanır. AFM, ilgili bölümdeki konsolu tarayarak bir numunenin yüzey topografyasının görüntüsünü yakalar. Numune yüzeyinin yüksekliğine veya alçaklığına bağlı olarak pozitif duyarlı bir fotodiyot (PSDP) tarafından takip edilen ışının sapmasını belirler.



Şekil 3. 2. (a) Kullanılan AFM cihazı (b) AFM temsili çalışma gösterimi

AFM cihazında ölçüme başlanırken iğnenin numune yüzeyine yaklaşması ile iğne ve yüzey arasında çekim kuvveti meydana gelir. Oluşan çekim kuvveti iğnenin numune yüzeyine doğru kaymasına neden olur ve iğne yüzeye yaklaştırıldığında sanki yüzeye değiyormuş gibi bir itme kuvveti oluşturarak iğnenin numune yüzeyinden dışarı doğru kaymasına neden olur. İğnenin ucu ile numune yüzeyi arasında oluşan bu çekim kuvveti; numunenin spesifik yapısına, probun ucuna ve yüzeye olan uzaklığa bağlıdır. Sonuç olarak, nano boyutta kaplanmış örnek numunenin yüzey morfolojisi, faz kontrastı, parçacık boyutu ve elektrik ve manyetik alan yönelimleri gibi çeşitli fiziksel özelliklerinin incelenmesine yardımcı olur.

Bu tez çalışmasında Bingöl Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan XE-100E model AFM kullanılmıştır.

3.4. TENG Elektriksel Parametre Ölçümü

TENG'in elektriksel çıktı performansı, kapasitif ve direnç yükleri etkisi altında test edilir. TENG sabit güç kaynağı veya sensor olarak kullanıldığında dirençli yükle; şarj cihazı olarak kullanıldığında ise kapasitif yükle performansı test edilir. Temas ayırma modu ile çalışan TENG sistemleri, yön ve yoğunluk değiştiren alternatif bir akım üretir. TENG

elektriksel çıkış performansı, voltaj değerlerini ölçmek için Rigol DS4014 marka osiloskop kullanılmıştır.

TENG'in anlık akım, anlık voltaj ve güç değerlerinin hesaplanması ölçüm aletinin paralel veya seri bağlanması durumuna göre değişiklik gösterir. Güç değeri ölçümü aşağıdaki bağlantı kullanılarak hesaplandı:

$$P = VI \quad (3.1)$$

Denklemden V , TENG'de kullanılan elektrotlar arasındaki voltajı ifade etmektedir.

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

Denklemden R_{es} eşdeğer direnci ifade etmektedir. Dirençlerin devreye seri bağlanması durumundaki R_{es} şu şekildedir:

$$R_{es} = R_s + R_{in} \quad (3.3)$$

Dirençlerin devreye paralel bağlanması durumundaki R_{es} şu şekildedir:

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

TENG, birçok elektronik cihaza güç sağlamak için direkt olarak kullanılamaz. Nanogeneratörler sayesinde biriken enerjiyi depolamak ve yönetilebilir güç sağlayabilmek için enerji depolama birimi olmalıdır. Şarj cihazı olarak kullanılabilen TENG'lerin, şarj performansının test edilmesi ve optimum kapasitif yükünün belirlenmesi için farklı değerlere sahip kondansatörlerin TENG devresine bağlanması gerekmektedir. Bu şekilde hem uygun voltaj değeri hem de depolanan enerji miktarı kontrol edilerek elektronik aksama uygun akımın verilmesi sağlanır.

TENG çalışma mekanizmasına ek olarak dikey temas ayırma modu, elektrostatik potansiyel fark, ayırma aralığı uzaklığı ve yük transferi, genellikle "V-Q-x ilişkisi"

şeklinde isimlendirilen teorik bir formüle yol açar. Bir kondansatörde depolanan yük miktarı ise aşağıdaki bağıntı ile formüle edilmiştir:

$$Q = CV \quad (3.5)$$

Denklemden Q kondansatörde depolanan yük miktarını, V ölçülen kapasitans voltajını ifade ederken, C kapasite değerini ifade etmektedir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kimyadaki karşılığı kalsiyum karbür (CaC_2) olan karpit, bulunması kolay ve ucuz olan bir malzemedir. Renksiz, grimsi beyaz katı, ticari sınıf kahverengi veya siyah bir görünüme sahip olabilmektedir. Yaklaşık $2,22 \text{ g/cm}^3$ ’lük bir yoğunluk ve yaklaşık 2160°C (3920°F) gibi yüksek bir erime noktası sergiler. Su ile temas ettiğinde, oldukça yanıcı asetilen gazı (C_2H_2) ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) üreten güçlü bir ekzotermik reaksiyona girer. Bu özellik, onu çeşitli endüstrilerde bir yakıt ve kimyasal hammadde olarak hizmet eden asetilen gazı üretiminde önemli bir bileşen haline getirir. Ayrıca kalsiyum karbür, metal üretimi sırasında demir ve çeliğin kükürt giderme işleminde kullanılır ve geçmişte aydınlatma için kullanılan karbür lambaların bir bileşeni olarak tarihsel öneme sahiptir.

4.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri

Şekil 4.1’de Saf PVP nanofiberin iki farklı açıdan ve iki farklı boyutta SEM görüntüleri gösterilmektedir. Image J programı ile yapılan ölçümlere göre ortalama çap $605 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Saf PVP nanofiberin pürüzsüz bir yüzey morfolojisine ve homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Üretilen PVP’nin varlığını ve yapısını doğrulamak için element haritaları analiz yapılmıştır. Şekil 4.7’de PVP fiberlerde bulunan karbon ve oksijen elementlerinin görünümü ve yaklaşık yoğunlukları gösterilmektedir. Saf PVP element haritası, katkılı PVP’lerin değerlendirmesinde referans olacaktır.

Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiberin SEM görüntüleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Fiberlerin sürekli bir formda elde edildiği, ancak fiber içinde topaklanma gözlemlenmesi nedeniyle, katkılanmış moleküllerin heterojen dağıldığı anlaşılmıştır. Image J programı ile yapılan ölçümlere göre ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiber için ölçülen ortalama çap $468 \mu\text{m}$ mikron olarak elde edilmiştir. Saf PVP’ye nazaran ortalama fiber çapının önemli bir oranda azaldığı görülmektedir. Üretilen nanofiberlerde karpitin varlığını ve yapısını doğrulamak için element haritaları analizi

yapılmıştır. Şekil 4.8’de görülen kalsiyumun varlığı fiberlerde karpitin varlığını doğrulanmaktadır.

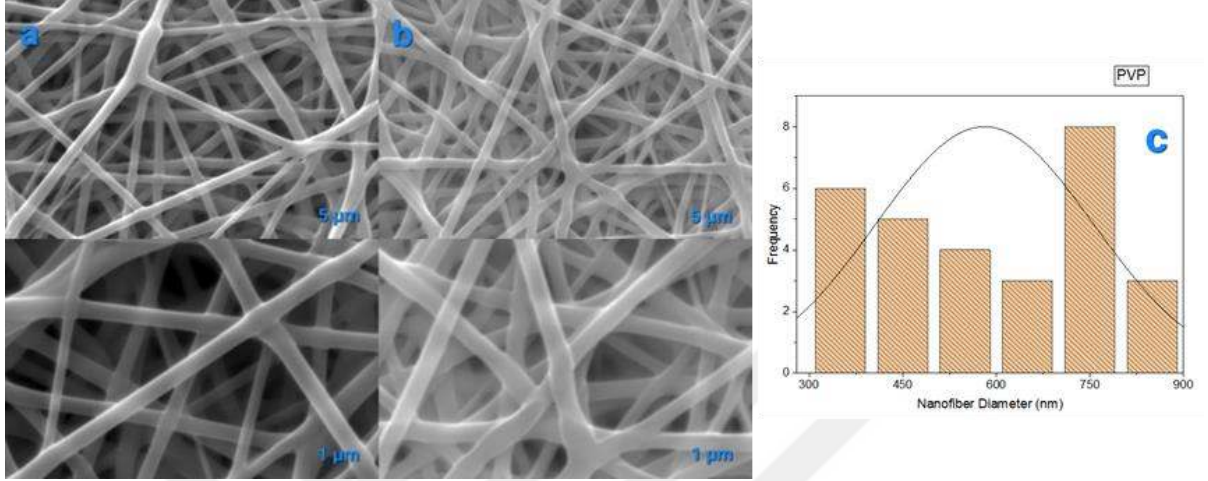
Şekil 4.3’de ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberin üç farklı açıdan ve iki farklı boyutta SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekillerde fiberlerin uzun formda oluştuğu, ancak fiber içinde yer yer topaklanma gözlemlenmesi nedeniyle, katkılanmış moleküllerin heterojen dağıldığı görülmektedir. Image J programı ile yapılan ölçümlere göre ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiber için ölçülen ortalama çap 306 µm mikron olarak elde edilmiştir. Ortalama fiber çapının önceki fiberlere nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.9’da gösterilen element haritası, Ca elementinin homojen dağıldığını ve karpitin fiberlerde dağılımının homojene yakın olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.4’de ağırlıkça %5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan ve iki farklı boyutta SEM görüntüleri gösterilmektedir. Fiberlerin, önceki sonuçlara benzer olarak uzun ve ince formlarda oluştuğu, ancak fiber içinde yer yer topaklanma miktarının arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %5 C katkılı PVP nanofiber için ölçülen ortalama çap 300 µm mikron olarak elde edilmiştir. %5 karpit katkılı PVP fiberlerinin ortalama çapının, %2,5 karpit katkılı PVP ile çok yakın olduğu ancak topaklanma miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.10’da gösterilen element haritasında karpitin fiberler içinde topaklandığını göstermektedir.

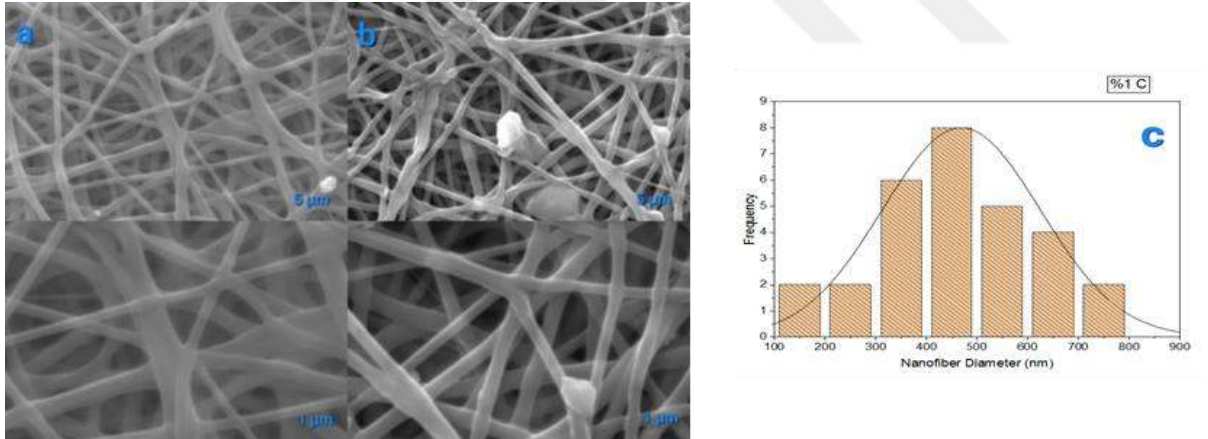
Şekil 4.5’de ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan ve iki farklı boyutta SEM görüntüleri gösterilmektedir. Fiber içerisinde yoğun topaklanma gözlemlenmesi nedeniyle, katkılanmış moleküllerin heterojen dağıldığı anlaşılmıştır. Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiber için ölçülen ortalama çap 448 µm mikron olarak elde edilmiştir. Fiber çapının saf PVP’ye daha düşük ancak %2,5 ve %5 karpit katkılı PVP’ye nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.11’de görülen Ca elementinin dağılımı, karpitin fiberler içinde dağılımını göstermektedir.

Şekil 4.6’da ağırlıkça %10 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan ve iki farklı boyutta SEM görüntüleri gösterilmektedir. Fiber içerisinde yer yer yoğun topaklanma gözlemlenmesi sebebiyle de katkılanmış moleküllerin heterojen dağıldığı anlaşılmıştır.

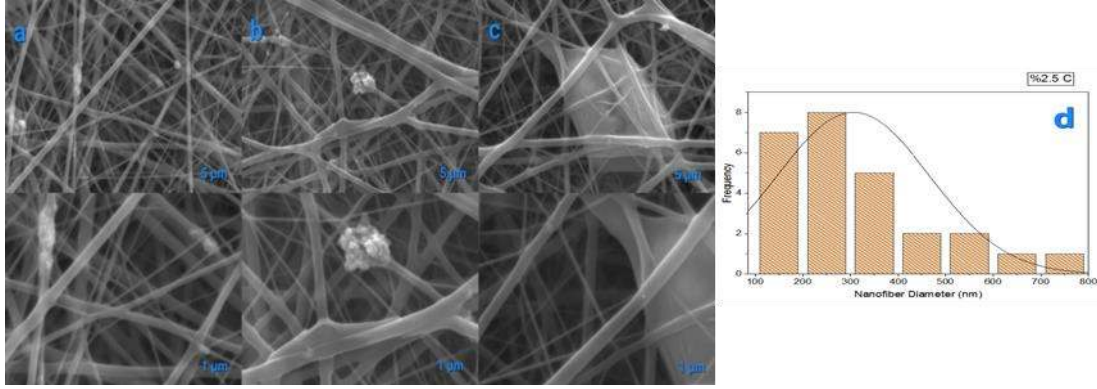
%10 karpit katkılı PVP nanofiber için ölçülen ortalama $500 \mu\text{m}$ mikron olarak elde edilmiştir. Bu çap genişliği Saf PVP'den sonra görülen en yüksek ortalama çap tır. Şekil 4.12'de görülen Ca elementinin varlığı karpitin varlığını doğrulamaktadır.



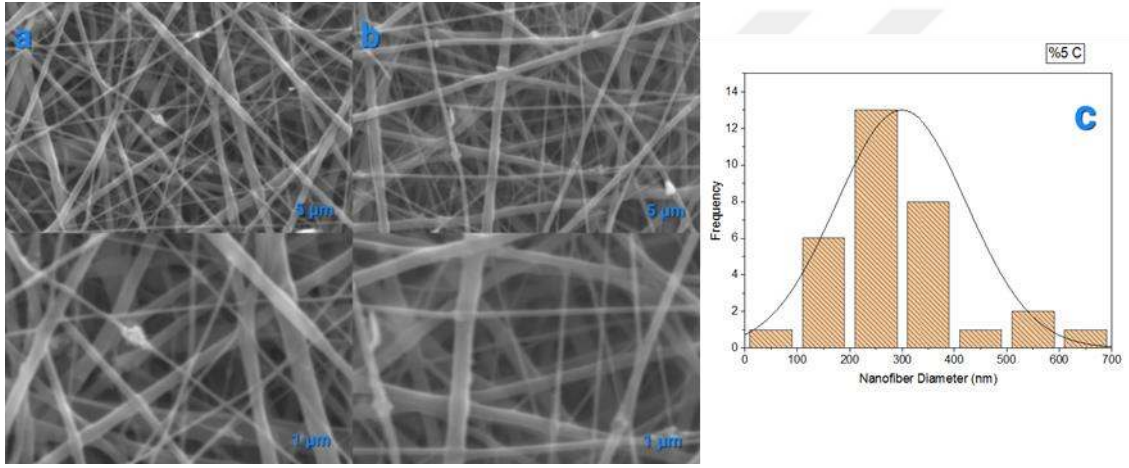
Şekil 4.1. Saf PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 μm ve 1 μm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Saf PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.



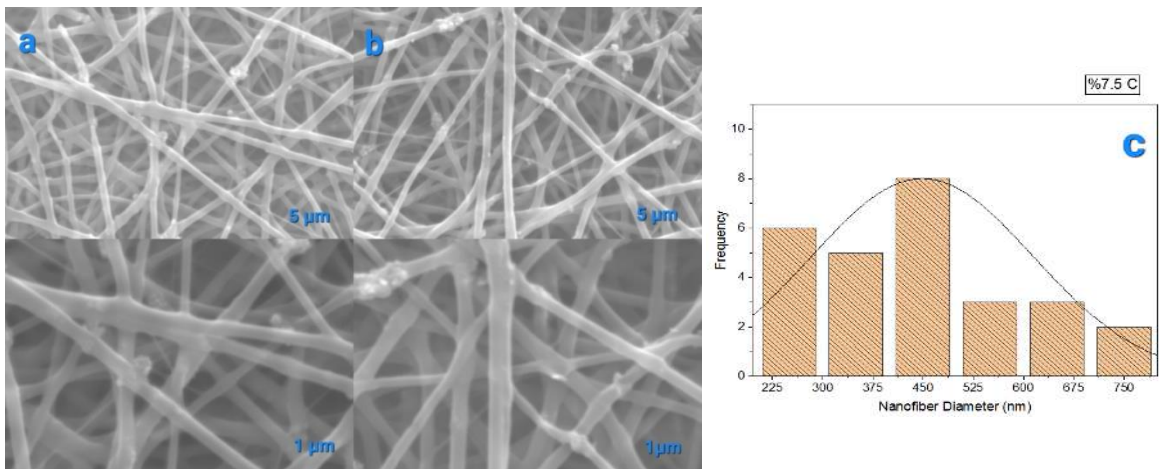
Şekil 4.2. Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 μm ve 1 μm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.



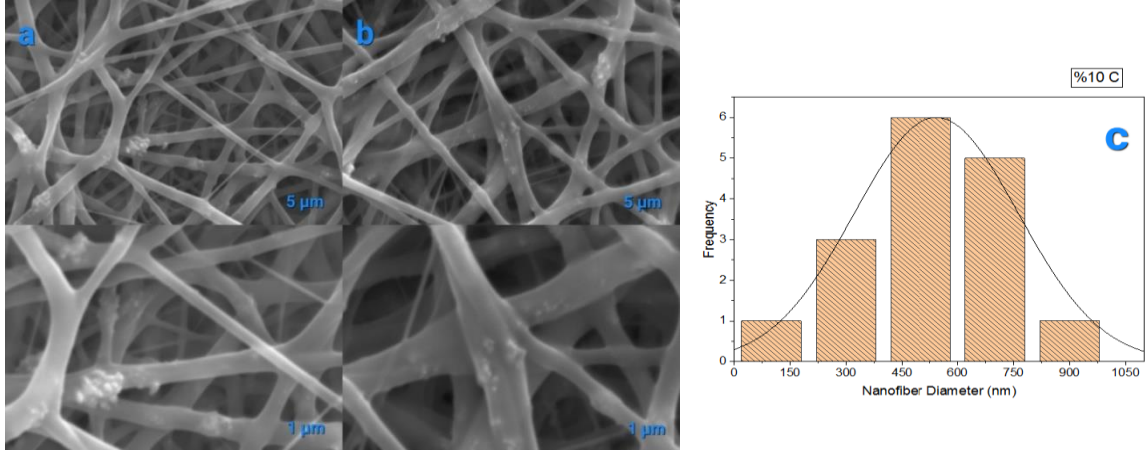
Şekil 4.3. Ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 μm ve 1 μm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği.



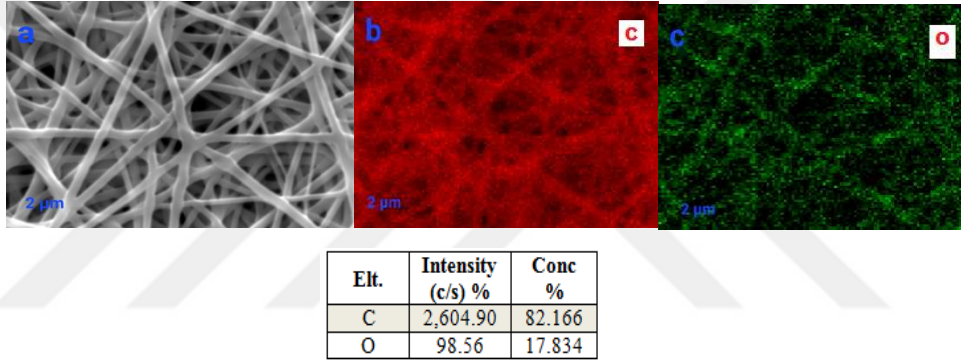
Şekil 4. 4. Ağırlıkça %5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 μm ve 1 μm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği



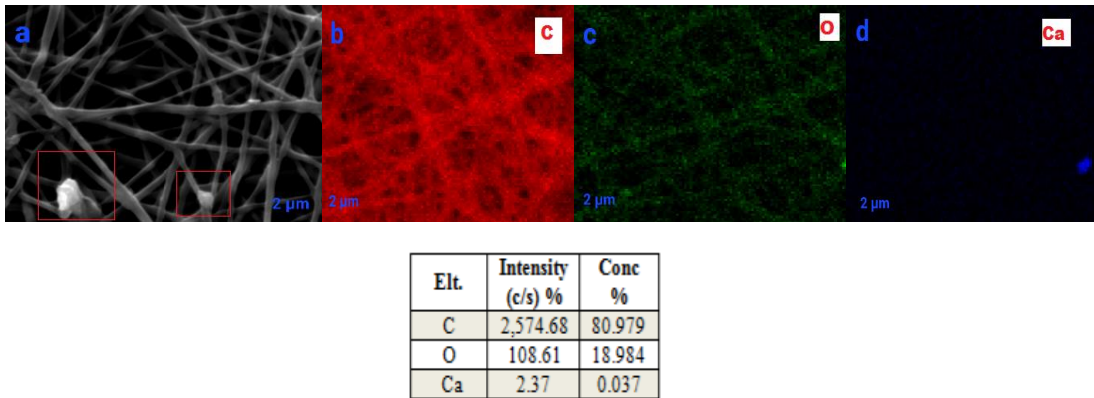
Şekil 4.5. Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 μm ve 1 μm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği



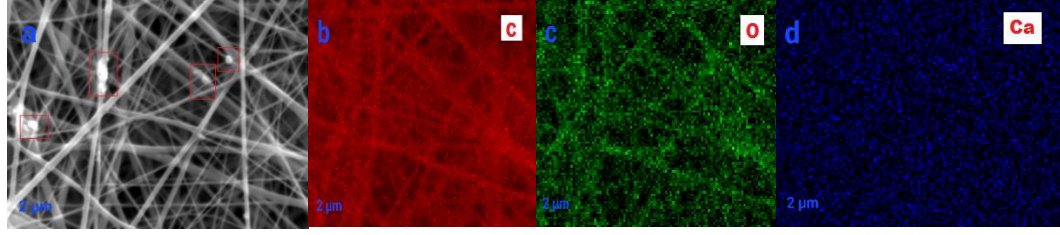
Şekil 4.6. Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin iki farklı açıdan (a ve b) 5 μm ve 1 μm genişlikteki SEM görüntüleri. (c) Ağırlıkça %7,5 karpit katkılı PVP nanofiberin boyut dağılım grafiği



Şekil 4.7. Saf PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası

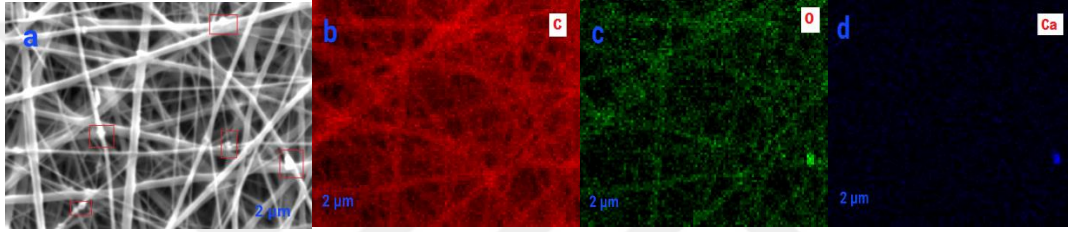


Şekil 4.8. %1 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası



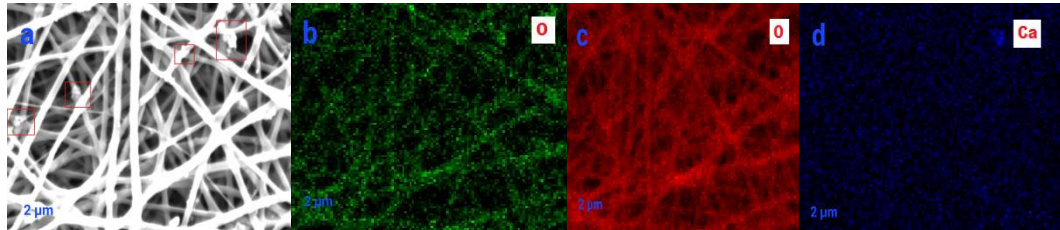
Elt.	Intensity (c/s) %	Conc %
C	2,986.38	79.930
O	138.57	20.028
Ca	3.19	0.042

Şekil 4. 9. %2,5 karpit katkı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası



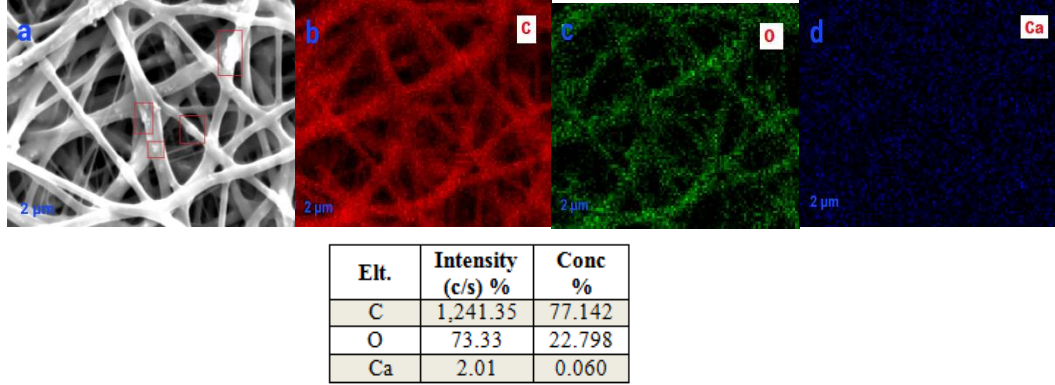
Elt.	Intensity (c/s) %	Conc %
C	1,802.96	79.321
O	88.11	20.602
Ca	3.56	0.077

Şekil 4.10. %5 karpit katkı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası



Elt.	Intensity (c/s) %	Conc %
C	1,839.45	80.212
O	83.12	19.731
Ca	2.64	0.057

Şekil 4.11. %7,5 karpit katkı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası



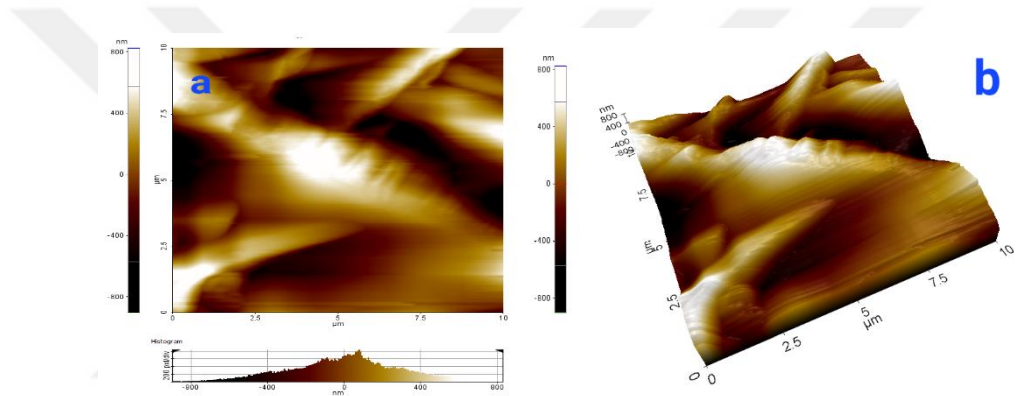
Şekil 4.12. %10 karpit katkılı PVP nanofiberin a) SEM görüntüsü, (b) karbon element haritası, (c) oksijen element haritası

4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Görüntüleri

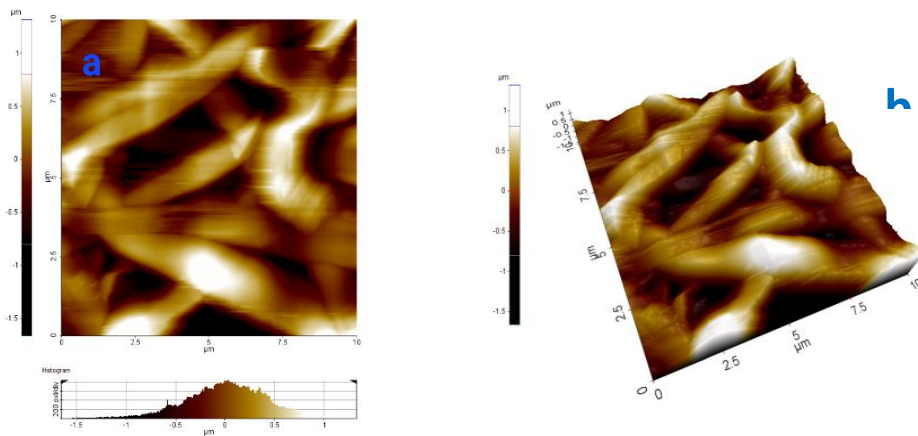
SEM cihazında elde edilen verileri desteklemek için PVP nanofiberleri farklı seviyelerde AFM cihazında yüzey morfolojisi ve 3D yüzey görüntüleri alınmıştır. Temas mod ile fiber dağılımında verimli görüntü elde edilemediğinden temassız mod ile görüntü alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, katkı oranı sırasıyla Şekil 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18’de gösterilmektedir. AFM görüntülerini sayısal verilerle değerlendirmek amacıyla ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), yüzey pürüzlülüğü ortalama karekökü (R_q) ve tepeden vadi yüksekliğine pürüzlülük (R_{pv}) değerleri kullanılmıştır. Tablo 4.1’de karpit katkılı PVP nanofiberlerin AFM görüntülerinden elde edilen R_a , R_q ve R_{pv} değerleri gösterilmektedir. R_a , R_q ve R_{pv} tanımlarının %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberde en yüksek değerleri yakaladığı görülmektedir. Bu sonuç, %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberde yüzey pürüzlülük miktarının ve pürüz derinliklerinin diğer PVP nanofiberlere nazaran en fazla olduğunu göstermektedir. SEM görüntü sonuçlarından hatırlanacağı üzere %2,5 karpit katkılı PVP fiberin ortalama çapı en düşüktü. Bu benzer sonuçlar, fiber çapıyla yüzey pürüzlülüğü arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ve fiber çapı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermektedir. Dielektrik malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün artması etkin yüzey alanını artırmaktadır. Artan etkin yüzey alanı ise, hava boşlukları oluşturmaması şartıyla, dielektriklerin tribo-potansiyelini artırmaktadır. SEM ve AFM sonuçları göz önüne alındığında en yüksek güç çıkışını, %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberden yapılan TENG’in vermesi beklenir.

Tablo 4.1. Farklı karpit katkı oranlarındaki PVP nanofiber için $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ ölçülü ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), yüzey pürüzlülüğü ortalama karekökü (R_q) ve tepeden vadi yüksekliğine pürüzlülük (R_{pv}) değerleri

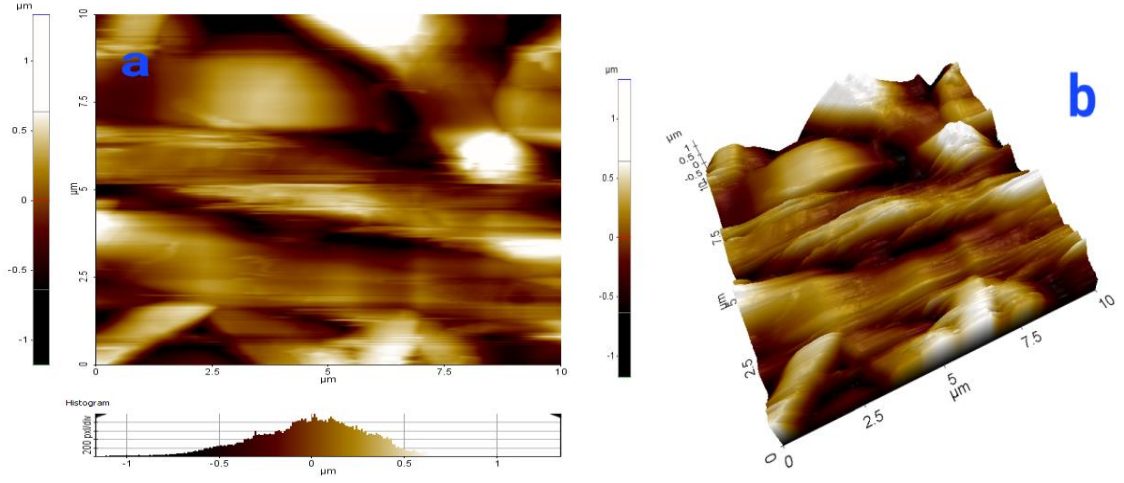
Katkı Oranı	R_a (nm)	R_q (nm)	R_{pv} (nm)
Saf	231	292	1726
%1	141	188	1616
%2,5	252	325	2511
%5	154	202	1606
%7,5	169	208	1384
%10	144	192	1626



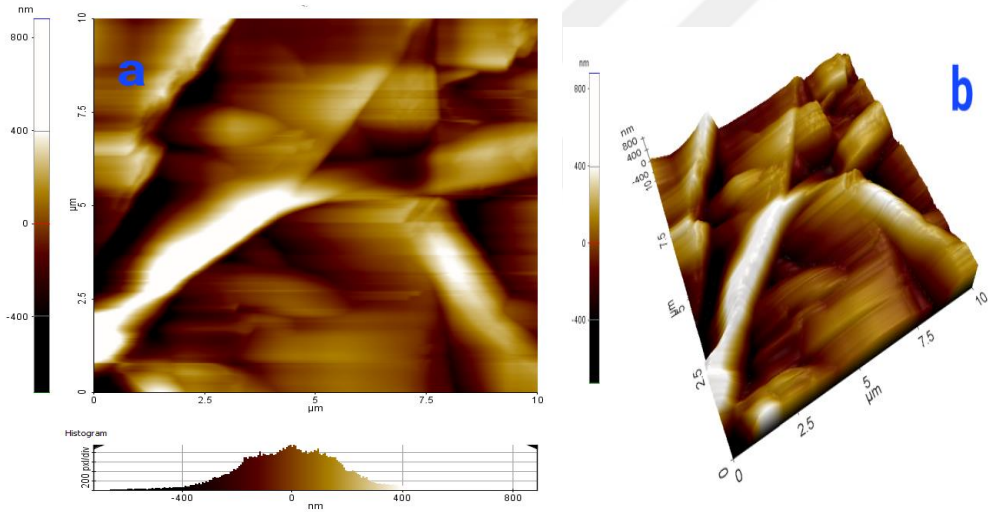
Şekil 4.13. Saf PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü



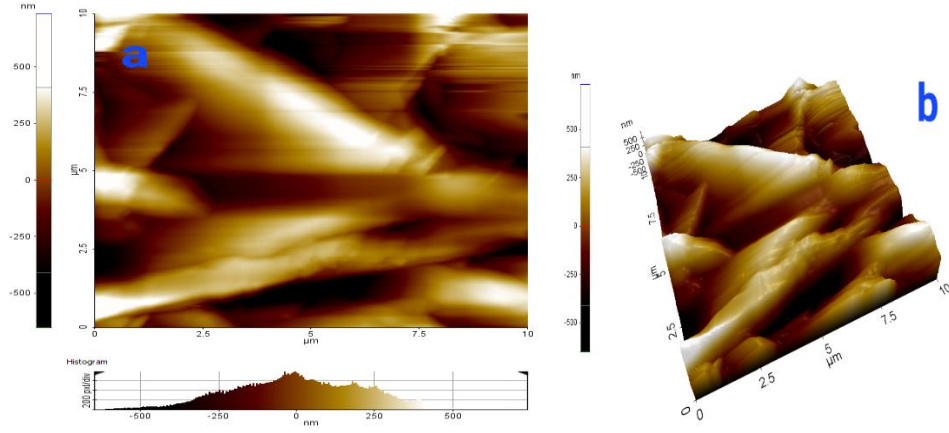
Şekil 4.14. Ağırlıkça %1 karpit katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $5 \times 5 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (c) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü



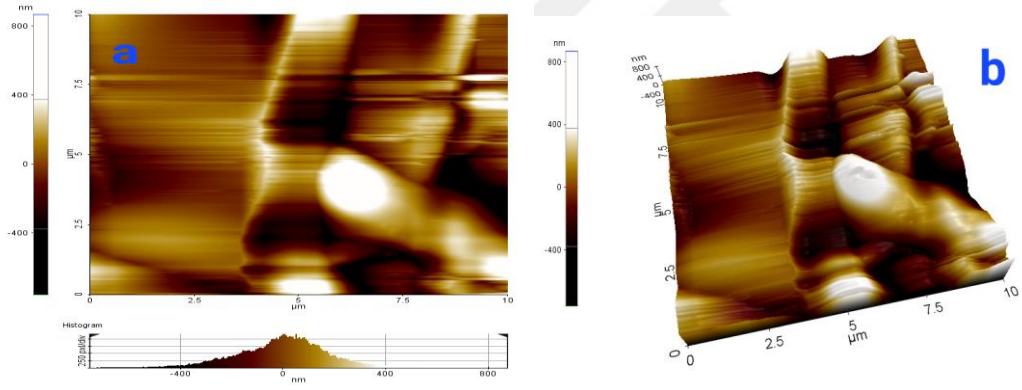
Şekil 4.15. Ağırlıkça %2,5 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü



Şekil 4.16. Ağırlıkça %5 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü



Şekil 4.17. Ağırlıkça %7,5 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü



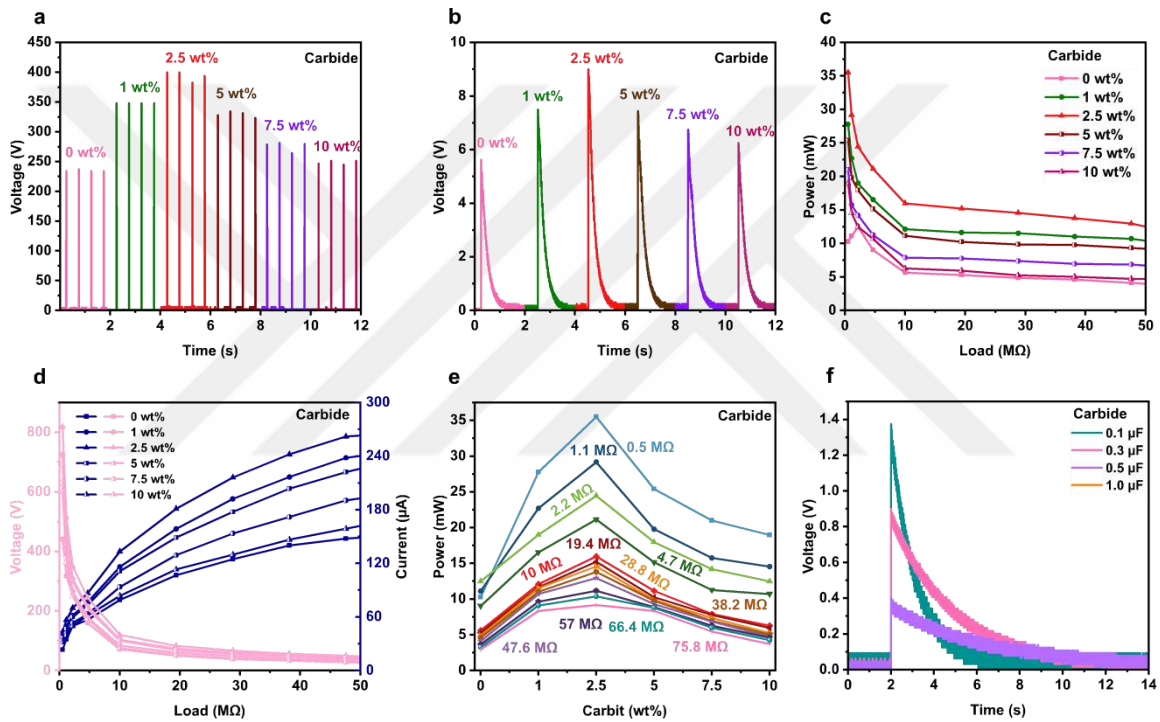
Şekil 4.18. Ağırlıkça %10 C katkılı PVP nanofiber için AFM yüzey morfolojisi (a) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ yüzey görüntüsü (b) $10 \times 10 \text{ } [\mu\text{m}]^2$ 3D yüzey görüntüsü

4.3. TENG'lerin Elektriksel Ölçümleri

TENG, mekanik enerjiyi elektriğe dönüştüren ayrıca makro veya mikro ölçekli güç üretimi sağlayabilen sistemlerdir. Ayrıca temas ayırma modu, kayan mod, tek elektrot modu ve bağımsız triboelektrik katman modu ile dört ana gruba ayrılır ve yapısal dielektrik güç üretimi ve triboelektrik şarj için kullanılabilir. Bunlardan en çok tercih edilen ve bilinen temas ayırma modudur [52]. Birbirine temas etmeyen dielektrik malzemeler başlangıçta nötrdür. TENG'in önceden ayrılmış dielektrikleri harici bir mekanik kuvvet tarafından temas ettirildiğinde, dielektriklerin yüzeyinde bir triboelektrik yük üretilir. Katmanların küçük bir boşlukla ayrılmasıyla, yalıtkanın dışına bağlanan iki düzlemsel elektrot arasında bir elektrostatik potansiyel farkı gelişir. Elektrotlar bir yüke bağlandığında, elektrostatik alanı dengelemek için negatif yüklü dielektrik yakınındaki elektrota serbest elektronlar akar. Buna genellikle elektrostatik indüksiyon denir. Sonunda, tekrarlanan temas ve ayırma adımları, harici elektrik yükü yoluyla alternatif bir akım üretir. Bu frekans, temas ve ayrılma döngüleri tarafından üretilir [54].

Şekil 4.19'da PVP nanofiberlere farklı seviyelerde (ağırlıkça %1, %2,5, %5, %7,5 ve %10) katkılanan karpit fiberleri ile üretilen TENG'lerin elektriksel çıkış performansları verilmiştir. TENG modellerinin çıkış gücü devreye bağlı yük direncine göre değişmektedir. Ölçüm cihazının (Osiloskop) iç direnci 10 M Ω 'dur. Şekil 4.19 (a)'da ağırlıkça farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'ler için çıkış voltajları gösterilmiştir. Osiloskobun iç direnci 10 M Ω olduğundan, bu sonuçlar aynı zamanda TENG modelinin 10 M Ω yükte sağladığı voltaj değerleridir. Elde edilen sonuçlara göre ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında karpit katkılı PVP nanofiberler ile üretilen maksimum TENG açık devre voltajının sırasıyla; 238 V, 349 V, 402 V, 336 V, 278 V ve 255 V olduğu gözlenmiştir. Temas ayırma modu TENG'ler, minimum akımda ve maksimum voltajda anlık enerji üretir. Kondansatörler, TENG tarafından üretilen enerjiyi düşük voltajda uzun vadede kullanım açısından depolamak amacıyla kullanılır. Bu nedenle, elektronik yükün çıkış voltajını ayarlamak için uygun bir kondansatör TENG'e paralel bağlanmıştır. Elde edilen enerji miktarını belirlemek amacıyla TENG, köprü diyot ile bir kondansatöre bağlanmıştır. Her bir darbeye karşılık gelen kondansatöre bağlı TENG cihazı tarafından görüntülenen voltaj değerleri aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 4.19 (b)'de bir darbeye denk gelen şarj-deşarj eğrileri gösterilmektedir. Kısa şarj/deşarj sürelerini izlemek için 0,022 μF kapasitör kullanılmıştır. Grafikte ölçülen kondansatör gerilim değerleri ağırlıkça %0, 1, 2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında karpit katkılı PVP nanofiberler için sırasıyla; 5,75 V, 7,85 V, 9.01 V, 7,41 V, 6,89 V ve 6,35 V şeklinde ölçülmüştür ve bu değerler açık devre gerilimi ile oldukça uyumlu bulunmuştur. Daha sonra her bir PVP nanofiberde depolanan enerji miktarı $Q=CV$ formülünden sırasıyla; 126,5 nC, 172,7 nC, 198,22 nC, 163,02 nC, 151,58 nC ve 139,7 nC olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.19. Farklı seviyelerde karpit katkılanan PVP'den üretilen TENG'lerin (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) karpit

Şekil 4.19 (c)'de farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'lerin çeşitli direnç değerleri için maksimum güç noktaları verilmiştir. Tüm malzemeler de maksimum güç noktaları $P = V^2/R$ formülü kullanılarak bulunmuştur. Yük 2,2 M Ω iken en yüksek değeri göstermiştir. Çeşitli elektronik cihazlarda farklı kapasitif yükler kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise cihazların çalışmak için farklı ölçülerde güce ihtiyaç duymalarıdır. Dış yük olarak devreye 0,5 M Ω ila 40 M Ω arasında bir yük bağlanmıştır. Maksimum güç değerleri ağırlıkça %0,1, 2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında karpit katkılı PVP nanofiberleri için

değerler sırasıyla; 13 mW, 28 mW, 36 mW, 26 mW, 22 mW, 19 mW elde edilmiştir. Güç eğrileri bu sonuçlara göre, değişken yüklere karşı benzer değişiklikler göstermiştir. Şekil 4.19 (d)'de ağırlıkça farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'lerin akım voltaj eğrileri gösterilmiştir. Yük direnci arttıkça, omik kayıplarla akım sınırlanır, bu nedenle akım azalmaya, ancak gerilim artmaya devam eder. En yüksek gerilim değerleri ağırlıkça %0,1, 2,5, 5, 7,5 ve 10 oranlarında karpit katkılı PVP nanofiberleri için sırasıyla; 420 V, 720 V, 830 V, 648 V, 620 V ve 598 V olarak elde edilmiştir. En yüksek akım değerleri sırasıyla; 135 μA , 240 μA , 260 μA , 225 μA , 190 μA ve 146 μA olarak elde edilmiştir. Bu değişim yapısı, yük direnci ile üretilen güç değerleri arasındaki doğrusal olmayan durumlardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.19 (e)'de ağırlıkça farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'lerin farklı dirençler altında güç değişim eğrileri gösterilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda TENG çıkış gücü, ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP malzemeye kadar artmış, ancak karpitin katkılanma miktarının artmasıyla düşmesine sebep olmuştur. Grafiğe dayalı olarak, 0.5 M Ω 'da 35,9 mW'lik maksimum tepe çıkış gücünün, ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP'den üretilen TENG tarafından sağlandığı gözlenmektedir. Farklı yükler altında elde edilen bu veriler, TENG devre tasarımında ve enerji depolama da belirleyici unsurlar olmuştur. Şekil 4.19 (f)'de ağırlıkça farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'lerin farklı kapasitif yükler altında şarj-deşarj eğrileri gösterilmiştir. Kapasitif değerler arttıkça tepe gerilim değerinin düştüğü, şarj süresinin uzadığı söylenebilir.

TENG'lerin performansına etki eden V - Q - X olmak üzere üç ana parametre vardır. Bu üç parametre kullanıldığında TENG'in güç üretimi hakkında temel formüller elde edilir. Oluşan bu formüllerde aktarılan yük miktarı (Q), elektrotlar arası voltaj değeri (V) ve iki triboelektrik elektrot arasındaki ayırma mesafesi (x) ile ifade edilmektedir. Temas modu TENG'ler için V - Q - X ilişkisi şu şekilde formüle edilir [95]:

$$V = -\frac{Q}{S\epsilon_0} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

İlk olarak, açık devre ve kısa devre koşullarının iki özel durumunu analiz edilmektedir. Açık devre koşulunda yük aktarımı yoktur, bu da Q 'nın 0 olduğu anlamına gelir. Bu sebeple, açık devre gerilim değeri V_{OC} şu şekilde ifade edilir [95]:

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

Kısa devre koşulunda, $V = 0$ 'dır. Bundan dolayı, aktarılan yükler şu şekilde ifade edilir:

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

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

Bir temas modu TENG'nin tercihe bağlı bir direnç R 'ye bağlandığı genel durumlarda, çıkış özellikleri ile Ohm yasası birleştirilerek şu ifade elde edilir:

$$V = IR = R \frac{dQ}{dt} \quad (4.5)$$

Denklem 4.1 ile denklem 4.5'den faydalanılarak:

$$R \frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{S\varepsilon_0} \left(\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\varepsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \quad (4.6)$$

denklemini elde edilir.

Yukarıda elde edilen formüller, malzeme boyutu, triboelektrik malzeme özellikleri ve TENG hareket hızı baz alınarak çeşitli yük dirençleri ile gerçek zamanlı akım-güç-voltaj değerlerinin hesaplanmasını sağlar. Bu denklemler, TENG'i mümkün olan en yüksek güç çıkışıyla üretmek için TENG'in malzeme özellikleri ve boyutunu en uygun hale getirmek için kullanılabilir. Dielektrik malzeme kalınlığına (d_1 ve d_2) göre farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'ler için voltaj ve güç değerleri önce artar, daha sonra azalır. Fakat denklem (4.1)'de elde edilen formüle göre malzeme kalınlığı arttıkça gerilim değerlerinin düşmesi beklenir. Ancak TENG'in elektriksel performansı yalnızca malzeme

kalınlığına bağlı olmamakla birlikte, optimum kalınlığa varana kadar elektriksel performans artışı da diğer çeşitli parametrelere bağlıdır.

SEM ve AFM sonuçları göz önüne alındığında, %2,5 karpit katkı TENG'in en iyi elektriksel güç çıkışını vermesi beklenen bir sonuçtur. SEM sonuçlarına göre ortalama çapı en az olan fiber %2,5 karpit katkı PVP nanofiberdir.

Ortalama çapın düşmesi birim alana düşen fiber sayısını ve dolayısıyla etkin yüzey alanını artırmaktadır. Etkin yüzey alının artmasıyla, dielektrikler arasında elektriksel yüklerin transferi için yeni yollar açılmaktadır. Böylece dielektrikler arasında yük transferi artmakta ve TENG'de depo edilen şarj miktarı yükselmektedir. AFM sonuçlarına göre, fiber çapının azalmasının bir diğer önemli etkisi yüzey pürüzlülüğünün artmasında gözlenmiştir. Artan pürüzlülük fiberler arasında hava boşluğuna neden olmamış ve etkin temas yüzeyinin artmasına neden olmuştur. %2,5 üzerindeki katkı oranlarında topaklanmalar fazla olduğundan, fiber çapları saf PVP'ye nazaran daha düşük olsa da güç çıkışındaki artış sınırlı kamıştır. Bu değerlendirmeler ışığında, fiberlerin ortalama çaplarının en az ve yüzey pürüzlülüğünün en fazla olması nedeniyle en yüksek güç hasatı %2,5 karpit katkı TENG'den elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, TENG'lerin çıkış performansını iyileştirmek ve daha yüksek güç yoğunluğu elde etmek için sırasıyla negatif ve pozitif dielektrik katmanlar olarak PAN ve karpit katkılı PVP nanofiber kullanılmıştır. Karpit, triboelektrik özellikleri iyileştirmek amacıyla farklı seviyelerde (ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5, %7,5 ve %10) PVP'ye katkılanmıştır. Üretilen nanofiberlerde karpit yapısını ve varlığını doğrulamak için SEM görüntüleri ve elemental harita analizleri yapılmıştır. Numune yüzey topografyasının görüntüleri alınmak için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) cihazı kullanılmıştır. SEM verilerinden yola çıkarak farklı seviyelerde karpit katkılı PVP nanofiberlerde, fiberlerinin kalın form ve ince formlarda dağınık yayıldığı, fiber içerisinde yer yer yoğun topaklanma gözlemlenmesi sebebiyle de katkılanmış moleküllerin heterojen dağıldığı anlaşılmıştır. Farklı seviyelerde karpit katkılı PVP nanofiberlerin, SEM görüntülerinin İmageJ programından faydalanılarak yapılan analizlerinden çap ortalamaları hesaplanmıştır. Analizler sonucunda en düşük çap ortalamasına sahip ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP nanofiber olduğu görülmüştür. Alansal element analizi taraması yapıldığından karpit fiberlerinin (Ca, C) PVP nanofiberde hemen hemen aynı yüzdelerde bulunduğu gözlemlenmiştir. AFM görüntü verilerinden yola çıkarak R_a , R_q ve R_{pv} değerlerinin %2,5 katkılı fiberde en yüksek olduğu gözlenmiştir. AFM cihazında yüzey morfoloji verileri ve 3D yüzey görüntüleri elde edilen karpit fiberlerinin, PVP malzeme yüzeyine ince fiberler halinde ancak heterojen olarak dağıldığı gözlenmiş olup, SEM cihazında elde edilen veriler desteklenmiştir.

Elde edilen elektriksel çıkış verilerine göre, ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5, %7,5 ve %10 karpitin PVP nanofiberlere katkılanması, TENG çıktı değerlerini önce artırdığı daha sonra azalttığını göstermektedir. TENG deneylerinde en iyi çıkış gerilim değerini %2,5 karpit katkılı PVP nanofiberde elde edildiği görülmüştür. TENG güç çıkışları, PVP nanofibere katkılanan %2,5 karpit katkılı PVP malzemeye kadar artmış, ancak karpitin katkılanma miktarının artmasıyla düşmesine sebep olmuştur. $0.5 \text{ M}\Omega$ 'da $35,9 \text{ mW}$ 'lik

maksimum tepe çıkış gücünün, ağırlıkça %2,5 karpit katkılı PVP'den üretilen TENG tarafından sağlandığı gözlenmiştir.

Farklı oranlarda karpit katkılı PVP'den üretilen TENG'lerin farklı kapasitif yükler altında elde edilen şarj-deşarj verileri baz alındığında, kapasitif değerler arttıkça tepe gerilim değerinin düştüğü, şarj süresinin uzadığı söylenebilmektedir.

SEM, AFM ve elektriksel sonuçlar bütün olarak ele alındığında, karpit katkısının ağırlıkça %2,5 oranına kadar PVP nanofiberlerin ortalama çapı azalttığını ve yüzey pürüzlülüğünü artırdığını söylemek mümkündür. Azalan ortalama fiber çapı ve artan yüzey pürüzlülüğü nanofiber dielektrik malzemede etkin yüzey alanın gelişmesine neden olmaktadır. Etkin yüzey alanın artmasıyla dielektrik malzemeler arasında yük akışı kolaylaşmakta ve transfer edilen elektriksel yük miktarı artmaktadır. %2,5'dan daha büyük katkı oranlarında ise PVP fiberler üzerinde heterojen dağılımlı topaklanmalar başlamaktadır. Bu topaklanmalar dielektrikler arasında hava boşluklarına neden olduklarından yük akışını sınırlamakta ve TENG'lerin elektriksel güç çıkışını azaltmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Wang ZL. and J. Song, Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays, *Science*, vol. 2006; 312, (5771): 242-246.
- [2] Wang, ZL. Nanogenerators for self-powered devices and systems, ed: Georgia Institute of Technology, 2011.
- [3] Chen, J. Triboelectric nanogenerators, Georgia Institute of Technology, 2016.
- [4] Zhou, LD. Liu, J. Wang, and ZL. Wang, Triboelectric nanogenerators: fundamental physics and potential applications, *Friction*, vol. 2020; (3): 481-506.
- [5] Yar, A. A. Karabiber, A. Ozen, F. Ozel, and S. Coskun, Flexible nanofiber based triboelectric nanogenerators with high power conversion, *Renewable Energy*, vol. 2020; (162): 1428-1437.
- [6] Puet X. *al.*, Ultrastretchable, transparent triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting and tactile sensing, *Science advances*, vol. 2017; (3,5): e1700015.
- [7] Luo J.*et al.* Integration of micro-supercapacitors with triboelectric nanogenerators for a flexible self-charging power unit, *Nano Research*, vol. 2015; (8, 12): 3934-3943.
- [8] Mallineni, SSK. H. Behlow, Y. Dong, S. Bhattacharya, AM. Rao, and R. Podila, Facile and robust triboelectric nanogenerators assembled using off-the-shelf materials, *Nano Energy*, vol. 2017; (35): 263-270.
- [9] Petrescu, RV. FI. Petrescu, R. Aversa, and A. Apicella, Nano energy, 2017.
- [10] Bera, B. Literature review on triboelectric nanogenerator, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 2016; 8, (10): 1263-1271.
- [11] Ha M. J. Park, Y. Lee, and H. Ko, Triboelectric generators and sensors for self-powered wearable electronics, *Acs Nano*, vol. 2015; 9, (4): 3421-3427.
- [12] Wang, ZL. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors, *ACS nano*, vol. 2013;8, (7, 11): 9533-9557.
- [13] Zhu, G. B. Peng, J. Chen, Q. Jing, and ZL. Wang, Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications, *Nano Energy*, vol. 2015; (14): 126-138.

- [14] Chen S. *et al.*, Self-powered cleaning of air pollution by wind driven triboelectric nanogenerator, *Nano Energy*, vol. 2015; (14): 217-225.
- [15] Zhang H. *et al.*, Self-powered, wireless, remote meteorologic monitoring based on triboelectric nanogenerator operated by scavenging wind energy, *ACS applied materials & interfaces*, vol. 2016; (8, no. 48): 32649-32654.
- [16] Cao X. Y. Jie, N. Wang, and ZL. Wang, Triboelectric nanogenerators driven self-powered electrochemical processes for energy and environmental science, *Advanced Energy Materials*, vol.2016; (6, no. 23): 1600665.
- [17] Fan FR. ZQ. Tian, and ZL. Wang, Flexible triboelectric generator, *Nano energy*, vol. 2012; (1, no. 2): 328-334.
- [18] Fan FR. L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, and ZL. Wang, Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films, *Nano letters*, vol.2012; 12, (6): 3109-3114.
- [19] Kang H. *et al.*, Mechanically robust silver nanowires network for triboelectric nanogenerators, *Advanced Functional Materials*, vol.2016; (26, no. 42):7717-7724
- [20] Lee KY. *et al.*, Hydrophobic sponge structure-based triboelectric nanogenerator, *Advanced materials*, vol. 2014; (26, no. 29): 5037-5042.
- [21] Yang J. *et al.*, Broadband vibrational energy harvesting based on a triboelectric nanogenerator, *Advanced Energy Materials*, vol. 2014; (4, no. 6): 1301322.
- [22] Feng Y. Y. Zheng, G. Zhang, D. Wang, F. Zhou, and W. Liu, A new protocol toward high output TENG with polyimide as charge storage layer, *Nano Energy*, vol. 2017; (38): 467-476.
- [23] Davies DK. Charge generation on dielectric surfaces, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 1969; (2, no. 11): 1533.
- [24] Dhakar LP. Pitchappa, FEH. Tay, and C. Lee, An intelligent skin based self-powered finger motion sensor integrated with triboelectric nanogenerator, *Nano Energy*, vol. 2016; (19): 532-540.
- [25] Lin, ZH. G. Cheng, Y. Yang, YS. Zhou, S. Lee, and ZL. Wang, Triboelectric nanogenerator as an active UV photodetector, *Advanced Functional Materials*, vol.2014; 24, (19): 2810-2816.
- [26] Zhou YW. Deng, J. Xu, and J. Chen, Engineering materials at the nanoscale for triboelectric nanogenerators, *Cell Reports Physical Science*, vol. 2020; (1, no. 8): 100142.

- [27] Yılmaz ND. "-Triboelektrik Nanogeneratörler ile Enerji Hasadı: Teorik Köken, Çalışma Prensibi ve Çalışma Modları, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 2021; (9, no. 1): 232-249.
- [28] Jang YD. Kim, TY. Kim, K. Koh, U. Jeong, and J. Cho, Force-assembled triboelectric nanogenerator with high-humidity-resistant electricity generation using hierarchical surface morphology, *Nano Energy*, vol. 2016; (20): 283-293.
- [29] Chen X. *et al.*, A wave-shaped hybrid piezoelectric and triboelectric nanogenerator based on P (VDF-TrFE) nanofibers, *Nanoscale*, vol. 2017 (9, no. 3): 1263-1270.
- [30] Feng Y. Y. Zheng, S. Ma, D. Wang, F. Zhou, and W. Liu, High output polypropylene nanowire array triboelectric nanogenerator through surface structural control and chemical modification, *Nano Energy*, vol. 2016; (19): 48-57.
- [31] Zhang XS. *et al.*, High-performance triboelectric nanogenerator with enhanced energy density based on single-step fluorocarbon plasma treatment, *Nano Energy*, vol. 2014; (4): 123-131.
- [32] He X. H. Guo, X. Yue, J. Gao, Y. Xi, and C. Hu, Improving energy conversion efficiency for triboelectric nanogenerator with capacitor structure by maximizing surface charge density, *Nanoscale*, vol. 2015; (7, no. 5): 1896-1903.
- [33] Chen J. *et al.*, Enhancing performance of triboelectric nanogenerator by filling high dielectric nanoparticles into sponge PDMS film, *ACS applied materials & interfaces*, vol. 2016; (8, no. 1): 736-744.
- [34] Dzenis Y. Spinning continuous fibers for nanotechnology, *Science*, vol. 2004; 304 (5679): 1917-1919.
- [35] Yar A. Enhanced output performance of tetraethyl orthosilicate and graphene nanoplates-decorated nanofiber-based triboelectric nanogenerators, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 2021; 631, 127670.
- [36] Li D. and Y. Xia, Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?, *Advanced materials*, vol. 2004; 16, (14): 1151-1170.
- [37] Greiner A. and JH. Wendorff, Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers, *Angewandte Chemie International Edition*, vol.2007; 46, (30): 5670-5703.
- [38] Teo WE. and S. Ramakrishna, A review on electrospinning design and nanofibre assemblies, *Nanotechnology*, vol. 17, no. 14, p. R89, 2006.
- [39] Mandal DK. Henkel, and D. Schmeißer, Improved performance of a polymer nanogenerator based on silver nanoparticles doped electrospun P (VDF-HFP) nanofibers, *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 2004; 16, (22): 10403-10407.

- [40] Harnchana V. *et al.*, Enhanced power output of a triboelectric nanogenerator using poly (dimethylsiloxane) modified with graphene oxide and sodium dodecyl sulfate, *ACS applied materials & interfaces*, vol. 2018; 10, (30): 25263-25272.
- [41] Mi HY. X. Jing, MAB. Meador, H. Guo, LS. Turng, and S. Gong, Triboelectric nanogenerators made of porous polyamide nanofiber mats and polyimide aerogel film: output optimization and performance in circuits, *ACS applied materials & interfaces*, vol. 2018; (10, no. 36): 30596-30606.
- [42] Huang TC. Wang, H. Yu, H. Wang, Q. Zhang, and M. Zhu, Human walking-driven wearable all-fiber triboelectric nanogenerator containing electrospun polyvinylidene fluoride piezoelectric nanofibers, *Nano Energy*, vol. 2015; (14): 226-235.
- [43] Jang SH. Kim, Y. Kim, BJ. Kang, and JH. Oh, Honeycomb-like nanofiber based triboelectric nanogenerator using self-assembled electrospun poly (vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) nanofibers, *Applied Physics Letters*, vol.2016; 108, (14): 143901.
- [44] Zhang YY. Ding, Y. Li, J. Gao, and J. Yang, Synthesis and characterization of polyvinyl butyral–Al (NO₃)₃ composite sol used for alumina based fibers, *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 2009; 49, (3): 385-390.
- [45] Yu HT. Huang, M. Lu, M. Mao, Q. Zhang, and H. Wang, Enhanced power output of an electrospun PVDF/MWCNTs-based nanogenerator by tuning its conductivity, *Nanotechnology*, vol. 2013; 24, (40): 405401.
- [46] Wang SL. Lin, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, and ZL. Wang, Slidingtriboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism, *Nano Letters*, vol. 2013; 13, (5): 2226–2233.
- [47] Zhu G. *et al.*, Linear-grating triboelectric generator based on sliding electrification, *Nano Letters*, vol. 2013; 13, (5); 2282–2289.
- [48] Zhang CT. Zhou, W. Tang, C. Han, L. Zhang, and ZL. Wang, Rotatingdisk-based direct-current triboelectric nanogenerator, *Advanced Energy Materials*, vol. 4, no. 9, 2014G. SP. Castle, Contact charging between insulators, *Journal of Electrostatics*, vol. 1997; (40–41): 13–20.
- [49] Lin L. *et al.*, Segmentally structured disk triboelectric nanogenerator for harvesting rotational mechanical energy, *Nano Letters*, vol. 2013; 13, (6): 2916–2923.
- [50] Bai DP. *et al.*, Cylindrical rotating triboelectric nanogenerator, *ACS Nano*, vol. 2013; 7, (7): 6361–6366.
- [51] Zhang M. *et al.*, Robust design of unearthed single-electrode TENG from three-dimensionally hybridized copper/polydimethylsiloxane film, *Nano Energy*, vol. 2016; (30): 155–161.

- [52] Zhang H. et al., "Single-electrode-based rotating triboelectric nanogenerator for harvesting energy from tires," *ACS Nano*, vol. 2014; 8, (1): 680–689.
- [53] Lin ZH. G. Cheng, S. Lee, K. C. Pradel, and ZL. Wang, Harvesting water drop energy by a sequential contact-electrification and electrostatic induction process, *Advanced Materials*, vol. 2014; 26, (27): 4690–4696.
- [54] Hinchet RW. Seung, and SW. Kim, Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Electronics, *ChemSusChem*, vol. 2015; 8, (14): 2327–2344.
- [55] Niu S. et al., Theoretical investigation and structural optimization of single-electrode triboelectric nanogenerators, *Advanced Functional Materials*, vol. 2014; 24, (22): 3332–3340.
- [56] Wang S. Y. Xie, S. Niu, L. Lin, and ZL. Wang, Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes, *Advanced Materials*, vol. 2014; 26, (18): 2818–2824.
- [57] Niu S. et al., Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators, *Nano Energy*, vol. 2015; (12): 760–774.
- [58] Xie Y. et al., Grating-structured freestanding triboelectric-layer nanogenerator for harvesting mechanical energy at 85% total conversion efficiency, *Advanced Materials*, 2014.
- [59] Wang, S. S. Niu, J. Yang, L. Lin, and ZL. Wang, Quantitative measurements of vibration amplitude using a contact-mode freestanding triboelectric nanogenerator, *ACS Nano*, vol. 2014; 8, (12): 12004–12013.
- [60] Zhu G. et al., Harvesting water wave energy by asymmetric screening of electrostatic charges on a nanostructured hydrophobic thin-film surface, *ACS Nano*, vol. 2014; 8, (6): 6031–6037,
- [61] Zhao Z. et al., Freestanding Flag-Type Triboelectric Nanogenerator for Harvesting High-Altitude Wind Energy from Arbitrary Directions, *ACS Nano*, vol. 2016; 10, (2): 1780–1787.
- [62] Zhang, C., & Wang, ZL. (2018). *Triboelectric Nanogenerators* (pp. 1335–1376). Switzerland: Springer International Publishing.
- [63] Maxwell, J.C. XXV. On physical lines of force, PART I--The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(139), 281–291, 838–849. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/147864461086430331861a>

- [64] Maxwell, JC. XXV. On physical lines of force, PART I--The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 21(139), 12–24. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/147864461086430331861b>
- [65] Pu, X., Hu, W., & Wang, ZL. (2018). Nanogenerators for smart textiles. In ND. Yilmaz (Ed.), *Smart textiles: wearable nanotechnology* (1st ed., pp. 177–210). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener
- [66] Schwinger, J., DeRaad, LL., Milton, KA., & Tsai, W. (2019). *Classical Electrodynamics*. Classical Electrodynamics (3rd ed.). New York: Wiley. <https://doi.org/10.1201/9780429503542>
- [67] Sengupta, DL., & Sarkar, TK. (2003). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(2), 13–19. <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1203114>
- [68] Jondral, FK. (2008). From Maxwell's equations to cognitive radio. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008*. <https://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2008.4562458>
- [69] Scott, AW. (2005). *Understanding Microwaves*. New York: Wiley. Sengupta, DL., & Sarkar, TK. (2003). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(2), 13–19. <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1203114>.
- [70] Guo, S. (2010). *The Eigen Theory of Waves in Piezoelectric Solids*. IntechOpen. Retrieved from www.intechopen.com
- [71] Fan, FR., Tian, ZQ., & Lin Wang, Z. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>.
- [72] Khalid, S., Raouf, I., Khan, A., Kim, N., & Kim, HS. (2019). A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00144-y>
- [73] Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F., & Tao, XM. (2014). Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications. *Advanced Materials*, 26(31), 5310–5336.
- [74] Liang Q. et al., Recyclable and Green Triboelectric Nanogenerator, *Advanced Materials*, vol. 2017; 29, (5); 1604961–n/a, Feb.
- [75] Wilcke JC. *Disputatio physica experimentalis, de electricitatibus contrariis ...*, Typis Ioannis Iacobi Adleri ..., Rostochii, 1757.

- [76] Shaw PE. Experiments on Tribo-Electricity. I. The Tribo-Electric Series, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 94, pp. 16–33, 1917.
- [77] Diaz AF. and RM. Felix-Navarro, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties, *Journal of Electrostatics*, vol. 2004; 62, (4): 277–290.
- [78] Castle GSP, Contact charging between insulators, *Journal of Electrostatics*, vol. 1997; (40–41): 13–20.
- [79] Williams MW, Triboelectric charging of insulating polymers-some new perspectives, *AIP Advances*, vol. 2012; (2): 1.
- [80] Lacks DJ. The unpredictability of electrostatic charging, *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 2012; 51, (28): 6822–6823.
- [81] Wang SL. Lin, and ZL. Wang, Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics, *Nano Letters*, vol. 2012; 12, (12): 6339–6346.
- [82] Kanik M. et al., A motion- and sound-activated, 3d-printed, chalcogenidebased triboelectric nanogenerator, *Advanced Materials*, vol. 2015; 27, (14): 2367–2376.
- [83] Chen J. et al., Harmonic-resonator-based triboelectric nanogenerator as a sustainable power source and a self-powered active vibration sensor, *Advanced Materials*, vol.2013; 25, (42): 6094–6099.
- [84] Lin ZH. G. Cheng, L. Lin, S. Lee, and ZL. Wang, Water-solid surface contact electrification and its use for harvesting liquid-wave energy, *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 2013; 52, (48): 12545–12549.
- [85] Yang W. et al., Harvesting energy from the natural vibration of human walking, *ACS Nano*, vol.2013; 7, (12): 11317–11324.
- [86] Kim WD. Bhatia, S. Jeong, and D. Choi, Mechanical energy conversion systems for triboelectric nanogenerators: Kinematic and vibrational designs, *Nano Energy*, vol. 2019; (56): 307-321.
- [87] Kim, HJ. Hwang, D. Bhatia, Y. Lee, J. M. Baik, and D. Choi, Kinematic design for high performance triboelectric nanogenerators with enhanced working frequency, *Nano energy*, vol.2016; (21): 19-25.
- [88] Zheng Y. *et al.*, Energy Conversion Analysis of Multi-Layered Triboelectric Nanogenerators for Synergistic Rain and Solar Energy Harvesting, *Advanced Materials*, p. 2202238, 2022.
- [89] He J. *et al.*, Trampoline inspired stretchable triboelectric nanogenerators as tactile sensors for epidermal electronics, *Nano Energy*, vol. 2021; 81, p. 105590.

- [90] Lee KY. *et al.*, P-type polymer-hybridized high-performance piezoelectric nanogenerators, *Nano letters*, vol. 2012; 12, (4): 1959-1964.
- [91] Wang J. *et al.*, All-plastic-materials based self-charging power system composed of triboelectric nanogenerators and supercapacitors, *Advanced Functional Materials*, vol. 2016; 26, (7): 1070-1076.
- [92] Lu X. H. Qu, and M. Skorobogatiy, Piezoelectric Micro-and Nanostructured Fibers Fabricated from Thermoplastic Nanocomposites Using a Fiber Drawing Technique: Comparative Study and Potential Applications, *ECS Transactions*, vol.2018; 86, (16): 57.
- [93] Abolhasani MM. K. Shirvanimoghaddam, and M. Naebe, "PVDF/graphene composite nanofibers with enhanced piezoelectric performance for development of robust nanogenerators," *Composites Science and Technology*, vol. 2017; (138): 49-56.
- [94] Niu, S., Wang, S., Lin, L., Liu, Y., Zhou, YS., Hu, Y., and Wang, ZL. (2013). Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy and Environmental Science*, 6 (12), 3576–3583.