

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

**ÇOK KATLI VE YAY DESTEKLİ TRİBOELEKTRİK
NANOGENERATOR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ZEYNEP KINAŞ**

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER**

BİNGÖL-2022

ÖNSÖZ

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

Bu tez çalışmasının öncesinde ve hazırlanma aşamasında bilgi birikimlerini ve deneyler sırasında tecrübelerini benden esirgemeyen çalışmanın her aşamasında her türlü desteği sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER'e teşekkürü borç bilir, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Proje kapsamında birlikte çalıştığım Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim OKBAZ, Doç. Dr. Adem YAR, Doç. Dr. Faruk ÖZEL ve Arş. Gör. Dr. Adem SARILMAZ'a bu çalışmadaki emeklerinden ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Son olarak çalışmam esnasında bana her türlü desteği sağlayan ve yanımda olduğunu hissettiren çok sevdiğim değer verdiğim aileme ve arkadaşlarıma minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Zeynep KINAŞ

Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1. Triboelektrik Nanogeneratör.....	5
2.2. Triboelektrik Nanogeneratörlerin Teorik Temelleri.....	9
2.3. TENG'in Çalışma Prensibi.....	11
2.4. TENG'in Çalışma Modları.....	14
2.4.1. Temas Ayırma Modu.....	15
2.4.2. Yanal Kayma Modu.....	15
2.4.3. Tek Elektrot Modu.....	16
2.4.4. Bağımsız Katman Modu.....	17
2.5. Malzeme Seçimi.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Malzeme Üretimi.....	21
3.2. TENG İmalatı.....	22
3.3. Karakterizasyon.....	23
3.3.1. X-Işını Difraksiyonu (XRD).....	23
3.3.2. Optik Mikroskop.....	24
3.3.3. Optik Profil Oluşturucu.....	24
3.3.4. Osiloskop.....	24
3.3.5. Yorulma Cihazı.....	25
3.4. Deneyler.....	26

4. BULGULAR VE TARTIşMA.....	28
4.1. Malzeme Karakterizasyonu.....	28
4.2. Elektriksel Ölçümler.....	30
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİř.....	53



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Atomlar arası bağ uzunluğu
Al	: Alüminyum
B	: Manyetik alan
D	: Elektrik yer değiştirme vektörü
d	: Elektron bulutları arası mesafe
d	: Dielektrik malzemenin katman kalınlığı
E	: Elektrik alan büyüklüğü
E_1	: A malzemesi için elektronların yüzeylerden kaçması için gerekli potansiyel enerji
E_2	: B malzemesi için elektronların yüzeylerden kaçması için gerekli potansiyel enerji
E_A	: A malzemesinin atomlarındaki elektronların işgal edilmiş enerji seviyesi
E_B	: B malzemesinin atomlarındaki elektronların işgal edilmiş enerji seviyesi
ϵ_0	: Havanın dielektrik sabiti
ϵ_{r1}	: Dielektrik1'in dielektrik sabiti
ϵ_{r2}	: Dielektrik2'in dielektrik sabiti
H	: Manyatıslanma alanı
I	: Akım (A)
I_{sc}	: Kısa devre akımı
J	: Uzayda akım yoğunluğu
J_D	: Yer değiştirme akımı
P	: Polarizasyon alanı
P	: Güç (W)
P_s	: Yüzey yüklerinin varlığından kaynaklanan polarizasyon alanı
Q	: Aktarılan yük
R	: Direnç (Ω)
S_a	: Yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalama sapması

S_{py}	: Tepeden vadi yüksekliđi
S_q	: Yüzey topografyasının kök ortalama kare sapması
TENG	: Triboelektrik Nanogeneratör
Ti	: Titanyum
V	: Voltaj (V)
V_{oc}	: Açık devre voltajı
$x(t)$	: Dielektrik malzemeler arasındaki mesafe
XRD	: X-ışınım difraksiyonu
ρ	: Uzayda serbest dağılmış yükler
σ	: Üretilen yük

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Wimshurst makinesi (Bekir Ege et al., 2014), (b) Van de Graaff generatörü (Lieberman, 2015).....	7
Şekil 2.2.	İki atom arasındaki etkileşim potansiyeli , (a) denge konumunda, (b) itici bölgede (c) çekici bölgede ve (d-e) elektron bulutu-potansiyel-kuyu modeli (Z. L. Wang, 2020b).....	13
Şekil 2.3.	Temas ayırma modunun çalışma mekanizması.....	15
Şekil 2.4.	Yanal kayma modunun çalışma mekanizması.....	16
Şekil 2.5.	Tek elektrot modunun çalışma mekanizması.....	17
Şekil 2.6.	Bağımsız katman modunun çalışma mekanizması.....	18
Şekil 2.7.	Triboelektrik seri.....	19
Şekil 3.1.	Triboelektrik nanogeneratör.....	22
Şekil 3.2.	Çok katlı TENG tasarımı.....	23
Şekil 3.3.	Yorulma cihazı.....	25
Şekil 3.4.	Dirençlerin TENG devresine (a) seri ve (b) paralel bağlantısı şeması.....	27
Şekil 4.1.	Farklı oranlarda Al ve Ti katkılı silikonların XRD aracılığıyla karakterizasyonu.....	28
Şekil 4.2.	Optik Mikroskop altında Al (a, c, e, g) ve Ti (b, d, f, h) katkılı silikonun ((a, b) ağırlıkça %1, (c, d) ağırlıkça %2,5, (e, f) ağırlıkça %5 ve (g, h) ağırlıkça %10) görüntüleri.....	29
Şekil 4.3.	Optik Profil Oluşturucu altında (a-b) Al, (c-d) Ti katkılı dielektrik malzemelerin yüzey morfolojisi ve 3 boyutlu topografik harita görüntüleri.....	30
Şekil 4.4.	Ti veya Al katkılı silikonun kalınlığa bağlı olarak (a-b) çıkış gerilimler, (c-d) şarj-deşarj eğrileri (e-f) maksimum güç eğrileri.....	32
Şekil 4.5.	Ağırlıkça farklı oranlarda Ti veya Al katkılı silikonlar için (a-b) anlık voltaj eğrileri, (c-d) kapasitör şarj-deşarj eğrilerini, (e-f) sürekli frekansta şarj eğrileri.....	36

Şekil 4.6.	Ağırlıkça farklı oranlarda Ti veya Al katkılı silikonlar için (a-b) maksimum güç eğrileri, (c-d) akım-voltaj eğrileri ve (e-f) katılama oranına bağlı olarak güç değişim eğrileri.....	40
Şekil 4.7.	En iyi elektriksel çıktı veren Al veya Ti katkılı TENG'in (a-b) çok katlı anlık voltaj eğrileri, (c-d) şarj-deşarj eğrileri ve (e-f) farklı kapasitif yük altında şarj-deşarj eğrileri.....	43



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1.	Farklı kalınlıklarda Al veya Ti katkılı silikondan yapılan TENG'ler için elektriksel değerleri.....	33
Tablo 4.2.	Ağırlıkça farklı oranlarda Al ve Ti katkılı silikondan yapılan TENG'ler için elektriksel değerler.....	42



ÇOK KATLI VE YAY DESTEKLİ TRİBOELEKTRİK NANOGENERATOR TASARIMI

ÖZET

Teknolojinin çok hızlı geliştiği günümüzde elektronik cihazlar her alana yayılmıştır. Bu cihazların kullanımı her an her yerde enerjiye gereksinimi beraberinde getirmiştir. Bu nedenle her an enerji üretebilen yeni teknolojiler aranmaktadır. Bu arayışlar sonucunda bulunan Triboelektrik Nanogeneratör (TENG) enerji dönüşüm teknolojisi keşfedilmiştir. Dünyanın hemen her yerinde farklı türlerde ve küçük boyutlarda olan mekanik enerji türleri boşa harcanmaktadır. TENG boşa harcanan ortamdaki çeşitli ve küçük boyutlardaki mekanik enerjiyi toplayıp elektrik enerjisine dönüştüren bir teknolojidir. TENG iki farklı malzemenin temas etmesi sonucu elektrik enerjisi üretmeyi hedeflemektedir. Her malzeme farklı elektron ilgisine sahip olduğundan iki farklı malzeme kullanıldığı sürece elektrik enerjisi elde etmek mümkündür. Hafifliği, maliyet bakımından uygun olması, basit mekanizması, küçük boyutlarda olması, yüksek güç çıkışı gibi birçok avantaja sahiptir. Sahip olduğu bu özellikleri sayesinde TENG'ler taşınabilir elektronik cihazları beslemek için oldukça önemli enerji dönüşüm cihazlarıdır.

Bu çalışmada, TENG'lerin çıkış performansını geliştirmek için silikon içerisine Al veya Ti iletken parçacıkları eklenmiş ve maksimum güç çıkışı için optimum kalınlık ve optimum katkı oranı belirlenmiştir. TENG üretiminde tribo-pozitif malzeme olarak cam fiber, tribo-negatif malzeme olarak silikon kullanılmıştır. İlk olarak, silikon içerisine ağırlıkça %2,5 oranında Al veya Ti iletken parçacıkları eklenerek elde edilen güç değerlerine göre katkılı silikonlar için kalınlık optimizasyonu yapılmıştır. Al veya Ti katkılı silikondan üretilen TENG'ler için en yüksek güç yoğunluğu 0,85 mm kalınlığında elde edilmiştir. Kalınlık optimizasyonu yapıldıktan sonra, ağırlıkça farklı oranlarda Al veya Ti iletken parçacıkları eklenerek, katkı oranının TENG'in çıktı performansına etkisi gözlemlenmiştir. Al katkılı TENG'ler için en iyi elektriksel sonuçlar ağırlıkça %2,5 oranında alınır iken, Ti katkılı TENG'ler için en iyi elektriksel sonuçlar ağırlıkça %5 oranında alınmıştır. Son olarak, en iyi elektriksel sonuçlara sahip Al veya Ti katkılı silikonların çok katlı ölçümleri yapılarak TENG'in çıkış gücü artırmak hedeflenmiştir. Yapılan çok katlı TENG ölçümlerinde, akımın katman sayısı ile orantılı bir şekilde arttığını ve paralel bağlantının doğası gereği çıkış geriliminin sabit kaldığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Triboelektrik nanogeneratör, alüminyum, titanyum, silikon, elektrostatik indüksiyon, elektrik üretimi.

MULTI-LAYER AND SPRING-ASSISTED TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR DESIGN

ABSTRACT

In this age where technology is developing very fast, electronic devices have spread to every field. The use of these devices has brought the need for energy everywhere at any time. For this reason, new technologies that can produce energy at any time are sought. As a result of these searches, Triboelectric Nanogenerator (TENG) energy conversion technology was discovered. Different types of mechanical energy are wasted in almost every part of the world. TENG is a technology that collects various and small amounts of wasted mechanical energy and converts it into electrical energy. TENG aims to produce electrical energy as a result of the contact of two different materials. Since each material has different electron affinity, it is possible to obtain electrical energy as long as two different materials are used. It has many advantages such as light weight, low cost, simple mechanism, small dimensions, high power output. Thanks to these features, TENGs are very important energy conversion devices for feeding portable electronic devices.

In this study, Al or Ti conductive particles were added to silicon to improve the output performance of TENGs and the optimum additive ratio for maximum power output was determined. Glass fiber was used as tribo-positive material and silicon was used as tribo-negative material in TENG production. First, 2.5% by weight Al or Ti conductive particles were added to the silicon and thickness optimization was made for the doped silicones according to the obtained power values. For TENGs produced from Al or Ti doped silicon, the highest power density was obtained at 0.85 mm thickness. After the thickness optimization, Al or Ti conductive particles were added in different weight ratios, and the effect of the additive ratio on the output performance of TENG was observed. While the best electrical results were obtained at the rate of 2.5% by weight for Al doped TENGs, the best electrical results were obtained at 5% by weight for Ti doped TENGs. Finally, it is aimed to increase the output power of TENG by making multiple measurements of Al or Ti doped silicones with the best electrical results. Multi-layer TENG measurements showed that the current increased proportionally with the number of layers and the output voltage remained constant due to the nature of the parallel connection.

Keywords: Triboelectric nanogenerator, aluminum, titanium, silicone, electrostatic induction, electricity generation.

1. GİRİŞ

Enerji iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Dünyada birden çok enerji formu vardır. Var olan enerji türleri ile hayatın her anında ve alanında karşılaşılabilmektedir. Bir enerji türünü farklı bir enerji türüne dönüştürmek mümkündür. Enerji dönüşümü iş yapma olanağını ve ulaşımını kolaylaştırmaktadır. Enerji korunumu yasasına göre enerji yoktan var edilemez, var olan enerji de yok edilemez. Enerjinin kullanımı enerjiyi yok etmez onun biçim değiştirmesine neden olur. Potansiyel, kinetik, ısı, ışık, elektrik, kimyasal, nükleer ve ses gibi birçok enerji formu vardır. Enerji dönüşümü her yerde ve günün her dakikasında gerçekleşir. Günümüzde, enerji dönüşümleri için farklı yöntemler ve araçlar geliştirilmektedirler. Bu dönüştürülen enerji türlerinin depolanıp-saklanabilmeleri için birçok yöntem vardır ancak en bilindik olanları elektrik enerjisini depolayan piller ve bataryalardır.

Teknolojik gelişimlerin hızla ilerlediği 21. yüzyılda enerjiye olan talepte çok yüksek bir artış görülmüştür. Sanayi, ticaret, sağlık, eğitim, barınma vb. birçok faaliyet alanlarında enerji vazgeçilmez bir konuma sahiptir. Enerji talebinin büyük miktarı petrol ürünü kaynakları kullanılarak karşılanmaktadır. Petrol ürünleri kullanılarak büyük ölçeklerde enerji elde edilmektedir. Enerji talebini karşılamak için kullanılan kaynaklar arasında en çok rağbet gören fosil yakıtlar olmuştur ancak bu kaynakların kısıtlı miktarda var olması ve çevreye verdikleri zarar göz önüne alındığında yakın bir gelecekte insanlığın bir enerji kriziyle karşı karşıya kalacağı düşünülmektedir. Uzun yıllardır bilinen ancak enerji üretiminde az bir paya sahip olan yenilenebilir enerji son yıllarda yoğun bir ilgi görmektedir. Enerji kaynaklarının hızla azalması ve yeni enerji dönüşüm yöntemlerinin bulunması son yıllarda artan ilginin başlıca sebepleridir. Yenilenebilir enerji temiz, sürdürülebilir ve kaynak bakımından bol miktarda bulunmaktadır. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında çevreye zararları oldukça az miktardadır.

Elektrik, diğer enerji türlerine verimli bir şekilde dönüşebilen ve hemen hemen her türlü teknolojik cihazda kullanılabilen bir enerji türüdür. Kullanılan elektrik genel olarak elektromanyetik alternatör tarafından üretilir. Elektrik enerjisi genel olarak santraller

aracılığıyla üretilir ve elektrik tesisleri kullanılarak dağıtılır. Basit bir elektrik santrali kurmak için gerekli olanlar; bir enerji kaynağı, bir alternatör ve bir transformatördür. Santraller büyük arazilere ve enerji kaynağına yakın yerlere inşa edilir. Bu şebeke modelinde üretilen elektrik enerjisine her yerde ulaşılamamaktadır. Ancak teknolojik cihazların bu kadar yaygın olduğu günümüzde her an elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum insanların yeni, maliyet açısından düşük, kolaylıkla ulaşılabilecek ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına gereksinim duymalarına neden olmuştur.

Yakın zamanlarda keşfedilen Triboelektrik Nanogeneratör (TENG) ihtiyaç duyulduğu anda kolaylıkla enerji sağlayabilecek yeni enerji dönüşüm yöntemlerinden biridir. TENG'ler hayatımızın her alanında karşılaştığımız, genellikle olumsuz olarak bilinen, cihazlarda zararlar meydana getiren ve istenmeyen bir durum olan triboelektrik etkiyi basit bir şekilde elektrik enerjisi dönüştüren cihazlardır. TENG teknolojisi çevrede bulunan mekanik enerjiyi hasat ederek elektrik enerjisi üretir. Kolay kullanım, kolay üretim, basit tasarım ve sürdürülebilirlik gibi özellikleriyle ilgi çeken bir enerji üretim yöntemidir. Bu özellikleriyle TENG teknolojisi insan hayatında kullanılmak için oldukça önemli bir enerji kaynağı konumuna gelebilir. TENG çok yeni ve üzerinde halen çalışılmakta olan bir cihazdır. Günümüzde TENG'i ticarileştirilebilmek ve verimliliğini arttırmak için yoğun şekilde çalışılmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Hızla gelişen teknoloji ile birlikte günlük hayatta kullanılan elektronik cihazların sayısı giderek artmaktadır. Elektronik cihazların kullanımı ve taşınmasını kolaylaştırmak için boyutları küçültülüp, ağırlıkları azaltılmıştır. Elektronik cihazların boyutlarındaki küçülme ile orantılı bir şekilde bu cihazları çalıştırmak için gereken güç miktarıda azalmıştır. Günümüzde kullanılan mobil ve giyilebilir cihazların ilerleyen zamanlarda kullanım alanı ve oranında büyük bir artış kaçınılmazdır. Bu tür cihazların ihtiyaç duydukları gücün boyutları miliwatt (mW), mikrowatt (μ W) civarlarında küçük miktarlar olabilmektedir. Küçük ölçekte güç kullanan elektronik cihazların enerji ihtiyacı pil veya bataryalardan karşılanmaktadır. Pil veya bataryalar sınırlı ömürleri, bakım gerektirmeleri ve çevreye zarar veren kimyasal madde içermeleri gibi olumsuz etkilere sahiptir. Elektronik cihazların güvenle ve çevreye zararsız bir şekilde kullanımı için bu olumsuz etkilerin giderilmesi ya da minimize edilmesi gerekir. Nanogeneratörler, göz ardı edilen küçük boyutlardaki termal ve mekanik enerjileri kullanıp elektrik enerjisi üretmek için tasarlanmıştır.

Nanogeneratörler, ilk olarak 2006 yılında Zhong Lin Wang ve arkadaşları tarafından icat edilmiştir (Fan et al., 2012). Elektronik cihazların bağımsız, kablosuz ve sürdürülebilir çalışabilmeleri için düzenli enerji sağlayabilen kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Nanogeneratörler doğada küçük boyutlarda olan farklı türlerdeki atık enerjileri (termal ve mekanik) toplayıp elektrik enerjisine dönüştüren elektrik üreteçleridir. Bu atık enerjiler düzensiz bir yapıya ve düşük frekansa sahip olduklarından geleneksel jeneratörlerde kaynak olarak kullanıma uygun değildir. Bu sebeple enerji boyutunun küçük olması çoğunlukla önemsenmemesine ve boşa harcanmasına neden olmuştur. Nanogeneratör bu enerji israfını giderebilecek bir enerji üretim teknolojisidir.

Nanogeneratörler çıktı olarak elektriksel bir sinyal ürettiklerinden kendinden enerjili sensör olarak kullanılabilirler. Bu durum Nesnelerin İnternetinin gelişimi için oldukça önemlidir. Nanogeneratörler yapıları gereği sağlık sektöründe implante edilebilir

cihazların kolaylıkla ve güvenle kullanılmasına olanak sağlar. Nanogeneratörlerin gelişimi ve kullanımı sensör ağların gelişimi için oldukça önem arz etmektedir (Wang et al., 2012).

Nanogeneratörlerin keşfinden bugüne kadar piroelektrik, piezoelektrik ve triboelektrik etkilere dayalı üç tür nanogeneratör geliştirildi (Zi & Wang, 2017). Piroelektrik nanogeneratörlerde, belirli malzemelerin ısıtılmalarıyla oluşan sıcaklık farkı pozitif ve negatif yüklerin zıt uçlara hareket etmelerini sağlar böylece elektrik potansiyeli oluşur. Piroelektrik nanogeneratör yapımında kullanılan malzemeler mekanik olarak sıcaklık değişimlerine dayanıklıdır. Herhangi bir hareketli parça içermediğinden, az veya hiç bakım gerektirmezler bu da kullanım açısından oldukça avantaj sağlar. Piezoelektrik etkisinin sensör olarak kullanımı daha eskiye dayansa da (Han et al., 2015) nanogeneratör olarak kullanımı ilk defa 2006 yılında Wang ve arkadaşları tarafından önerildi. Piezoelektrik nanogeneratör, üretiminde kristal yapı malzemeler kullanılır. Fiziksel olarak basınca maruz bırakılarak elektrik enerjisi üreten bir cihazdır. Çevrede bulunan mekanik hareketlerden faydalanılarak enerji üretilebilir. Ayrıca günlük hayatta her yerde var olan titreşimi kullanarak kendinden enerjili elektronik cihazları beslemek için kullanılmaktadır (Yu et al., 2012). Piezoelektrik cihazların küçük boyutlarda üretilebilmeleri, ince yapıları ve esnek formatlarda üretilebilmeleri herhangi bir yüzeye kolayca monte edilebilmesine olanak sağlar. Ayrıca sahip oldukları bu özellikler bakımından biyosensör olarak oldukça kullanışlıdır. Triboelektrik nanogeneratörler sürtünmeye dayalı elektrik üreten bir teknolojidir. Farklı materyallerin birbirine sürtünmesi sonucu malzeme yüzeyinde yük biriktirilir ve biriken bu yükler hareket ederek bir elektrik enerjisi meydana getirirler. Mekanik enerji hasadı için piezoelektrik nanogeneratör ve triboelektrik nanogeneratör geliştirilirken, termal enerji hasadı için piroelektrik nanogeneratör geliştirilmiştir. Bu üç tip nanogeneratör verimlilikleri açısından karşılaştırıldıklarında en yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip olan nanogeneratörün triboelektrik nanogeneratör (TENG) olduğu söylenebilir.

Bilinen malzemeler çoğunlukla elektriksel olarak nötrdür. Nötr olan bir malzemenin şarj olabilmesi için, pozitif ve negatif yüklerin denge halinin bozulması gerekir. Yük denge halinin bozulması sürtünme, iletim ve indüksiyon yoluyla sağlanabilir. Normal şartlarda cisimlerin yüksüz olduğu varsayılır. Yüksüz cisimlerin birbirlerine yaklaşmaları bir şarj işlemine neden olmaz. Ancak yüklü bir cismin yüksüz bir cisme yaklaşması sonucu yük

dengesi bozulur ve bu olaya elektrostatik indüksiyon denir. Bu işlemten önce sistemin toplam şarjı sıfırdır yani yükler eşittir. Malzemelerin yaklaşması esnasında zıt işaretli yükler birbirini çeker aynı işaretli yükler birbirini iter. Elektrostatik indüksiyon yüzeyde net bir yük oluşturur. Yüklü cismin uzaklaşmasıyla yükler arasındaki denge tekrar kurulur.

2.1. Triboelektrik Nanogeneratörler

İlk olarak 2600 yıl önce Yunan filozof Milet Thales'in bir parça kehribarı kürkle ovaladıktan sonra kehribarın saman ve toz parçalarını çekebildiğini fark etmesi ile triboelektrik etki keşfedildi. Geçen bunca zamana rağmen triboelektrik mekanizması halen tam olarak anlaşılamamıştır. Ancak basit bir şekilde açıklamak gerekirse triboelektrik, potansiyel farkı dengelemek amacıyla bir malzemeden diğer malzemeye yük transferi olarak tanımlanabilir. Yüklerin bir malzemeden diğerine aktarılabilmesi için iki malzemenin temas etmeleri gerekir. Malzemeleri birbirine sürtmesi sonucu yüzey yük yoğunluğu artar ve malzemeler elektriksel olarak yüklenir. Malzemelerin sürtünme sonucu elektriksel olarak yüklenmesine triboelektrik etki veya triboelektrik şarj denir (Lungu, 2004). Üretilen elektriksel yükler malzemelerin polaritesi, yüzey pürüzlülüğü, ortam sıcaklığı, kalınlığı, gerinim gibi birçok farklı özelliğe göre değişir.

Triboelektrik etkisi antik çağlardan beri bilinen bir olgudur (Wang, 2013) ve günlük hayatta çok sık rastlanan etkilerden biridir. İki farklı malzemenin temasıyla yüklerin elektrokimyasal potansiyellerini eşitlemek için bir malzemeden diğerine hareket ettiği varsayılmaktadır. Aktarılan yükler elektron veya iyon/molekül olabilir. Malzemelerin ayrılması ile bir taraf fazladan elektron tutma eğilimi gösterirken diğer tarafta da elektronları verme eğilimi gösterir. Bu durum sonucunda malzemelerin yüzeylerinde triboelektrik yükler üretilir. Üretilen bu yüklerin hareketi triboelektrik etki olarak adlandırılır.

Triboelektrik 19. yüzyıldan beri elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. O zamandan bu yana farklı amaçlar için farklı cihazlar geliştirilmiştir. Üretilen bazı cihazlar büyük ölçeklerde gerilim üretmelerine rağmen günümüzde aktif bir şekilde kullanılmamaktadır. Bunlardan ikisi Wimshurst makinesi ve Van de Graaff generatörüdür.

Şekil 2.1’de örnek olarak Wimshurst makinesi ve Van de Graaff generatörü gösterilmektedir.

Wimshurst makinesi 1883’te James Wimshurst adında bir İngiliz mucit/mühendis tarafından icat edilmiştir. İki elektrot arasında bir elektrik potansiyeli üretmek için elektrostatik indüksiyonu kullanan bir cihazdır. 19. Yüzyılda var olan jeneratörlere kıyasla güçlü bir elektrik üretme kapasitesine sahiptir. Bir Wimshurst makinesi dielektrik diskler, elektrotlar, İletken plakalar, çift uçlu fırça, toplama tarakları, kapasitör adı verilen leyden kavanozları ve kol olmak üzere yedi ana parçadan oluşur. Wimshurst makinesi çalıştırılmadan önce elektrot üzerinde pozitif veya negatif bir yük bulunur. Elektrot üzerindeki bu yükün varlığı cihazın çalışmasına ve elektrik üretmesine olanak sağlar. Kol çevrilerek dielektrik diskler ters yönde hareket ettirilir. Disklerin çalışması ile disk üzerinde bulunan yük çift uçlu fırçaya doğru hareket edecektir. Yük fırçaya ulaştığında diğer taraftaki diskte zıt bir kutuplu bir yük oluşur. Diskler hareket ettikçe toplama tarakları yardımıyla pozitif ve negatif yükler ayrı ayrı olacak şekilde leyden kavanozlarında depolanır. Bu depolanma yeterli bir miktara ulaştığında metal bilyeler üzerinden kıvılcım şeklinde deşarj olur.

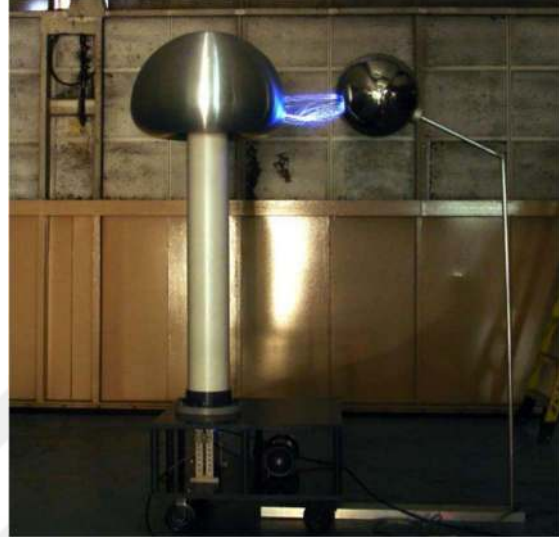
Van de Graaff generatörü 1931’de Amerikalı fizikçi Robert Jemison Van de Graaff tarafından icat edilmiştir. Bu generatör temel olarak yüksek voltaj üretebilen elektrostatik bir cihazdır. Bu generatör yaklaşık olarak 20 milyon volta kadar yüksek voltajlar üretme kabiliyetine sahiptir. Van de Graaff, ilk olarak parçacık hızlandırıcılar için gereken yüksek enerjiyi sağlamak için bu generatörü icat etmiştir. Bir Van de Graaff generatörü statik elektrik üretir ve sabit akım elektrostatik cihazları olarak da tanımlanır. Van De Graaff generatörü tarafından üretilen elektrik uygulanan yüke göre voltaj değişirken akım aynı kalır. Van de Graaff generatörünün çıkış terminaline topraklanmış bir nesneyle yaklaşıldığında voltaj düşer, ancak akım aynı kalır. Çok basit Van De Graaff üretici bir motor, iki adet silindir, yalıtımlı kayış, iki adet metal fırça, çıkış terminali olarak metal bir küreden oluşur. Motor çalıştırıldığında alt silindir kayışı döndürmeye başlar. Kayış kauçuktan yapılmışken alt silindir ve üst silindir farklı triboelektrik özelliğine sahip malzemelerden yapılmıştır. Generatörün içindeki kauçuk kayış, motor yardımıyla iki silindir arasında döner ve triboelektrik etki ile elektronlar bir silindirden kauçuğa ve kauçuktan diğer silindire doğru hareket eder. Bu süreç boyunca metal fırçalar yardımıyla

silindir üzerinde yük dengesi sağlanır. Böylece küre pozitif yüklenirken alt fırçaya bağlı metal çubuk negatif yüklenir. Metal çubuk küreye yaklaştırıldığında deşarj gerçekleşir.

a.



b.



Şekil 2.1. (a) Wimshurst makinesi (Bekir Ege et al., 2014), (b) Van de Graaff generatörü (Lieberman, 2015)

Triboelektrik etkinin en bariz örneği bulutların bir birlerine sürtünmesiyle meydana gelen yıldırımlardır (Chun et al., 2016). Son birkaç yüzyıldır teknolojinin hızlı gelişimi ve teknolojik cihazların hayatımızın her alanında bulunması triboelektrik etkinin daha fark edilir olmasına neden olmuştur. Triboelektrik olayı elektronik cihazlar üzerinde meydana geldiğinde cihazlarda arızalara neden olur. Bu durumun hasar oluşturmaması için elektronik cihazlarda topraklama yapılır. Triboelektrik hayatımızda genellikle istenmeyen bir etki olarak var olmuştur (Yar et al., 2021; Wang et al., 2012). Zhong Lin Wang ve arkadaşlarının piezoelektrik nanogeneratörler için malzeme araştırmaları sırasında 2012 yılında triboelektrik nanogeneratör (TENG) keşfedilmiştir (Kınas et al., 2022; Luo and Wang, 2020). Bu keşif ile triboelektrik etkinin hayatımıza olumlu bir katkısı ortaya konulmuştur.

Sürdürülebilir ve temiz güç kaynaklarına yönelik talep doğrultusunda yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Bu talep doğrultusunda bulunan yeni enerji dönüşüm cihazlarından biri olan TENG, çevrede var olan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi ile umut vaat eden bir teknolojidir (Wu et al., 2019). TENG günlük hayatımızın her alanında var olan

ama varlığı göz ardı edilen mekanik enerjiyi (rüzgâr, yağmur, okyanus/deniz dalgaları, gelgit, arabaların/trenlerin hareketi, yürüme, nabız atışı, kan akışı, kasların gerilmesi vb.) toplayıp elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji dönüşüm yöntemidir (Ozen et al., 2022; Kinas et al., 2022; Zhang et al., 2016; Wang et al., 2017; Chen et al., 2019). TENG'lerin çalışma prensibi tribo elektrifikasyon ve elektrostatik indüksiyonu birleştirerek bir elektrik akımı elde etmeye dayanır (Zhu et al., 2014; Niu and Wang, 2014; Yin et al., 2019). Hafifliği, maliyetinin az olması, basit tasarımı, geniş malzeme yelpazesi, yüksek güç çıkışı, ufak boyutlarda üretilebilmesi gibi dikkat çekici özelliklere sahiptir (Niu et al., 2013; Babu et al., 2022). Sahip olduğu bu özellikler son zamanlarda keşfedilen diğer enerji üretim yöntemlerine kıyasla TENG'i bir adım öne çıkarmaktadır. Nesnelerin İnterneti, sensör ağları ve giyilebilir elektronikler için ideal bir kaynak olarak önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

TENG'ler elektriksel bir çıkış sinyaline sahiptir. Bir güç kaynağı olarak elektronik bir cihazı çalıştırmak için doğrudan kullanılamazken kendinden enerjili bir sensörde doğrudan kullanılabilir (Ma et al., 2018). TENG kullanımı sensörlerin mekanik bir tepkiyi girdi olarak alıp çıktı olarak elektriksel bir sinyal vermelerine olanak sağlar. Bu durum geniş çapta dağıtılmış sensör ağlarına ihtiyaç duyan Nesnelerin İnterneti için TENG'in muazzam bir kaynak olduğunu gösterir (Li et al., 2019; Liu et al., 2021). Sensörlerin her biri farklı boyutlarda ancak düşük miktarlarda güce gereksinim duymaktadır. Tek bir sensör küçük miktarlarda güce gereksinim duyması rağmen bir sensör ağının tükettiği güç miktarı muazzam miktarlardadır. Sensörlerin güç gereksinimini gidermek için farklı boyutlarda kimyasal batarya/pil kullanılmaktadır. TENG kullanımıyla sensör ağlarının güç sistemlerinde şarj edilme, değiştirme/yenileme, bakım masrafları gibi gereksinimlere daha az ihtiyaç duyulmasıyla maliyette büyük bir miktarda düşüş olur (Wang et al., 2015; Wang, 2013). Ayrıca pil/batarya kullanımının önüne geçerek çevre kirliliğinin de büyük oranda azaltılmasına katkı sağlar (Niu and Wang, 2014). Güç kaynağı olarak ortamdaki mekanik enerjiyi toplayıp dönüştüren TENG sensör ağlarının gelişimi için oldukça önemlidir (Ozen et al., 2021).

Malzemelerin yüzeyleri üzerinde biriken yüklerinin hareketi ile bir elektrik akımı elde edilir. TENG'in ürettiği akım alternatif akımdır. Alternatif akım düzensiz bir yapıya sahip olduğundan elektronik cihazları çalıştırmak için doğrudan kullanılamaz. TENG tarafından

üretileen elektrik enerjisini elektronik cihazların çalıştırılmasında kullanmak için güç yönetim sistemlerine gereksinim duyulur (Liu et al., 2021; Zhu et al., 2014).

TENG diğler nanageneratörlere kıyasala çok iyi bir performansa sahiptir. Ayrıca keşfinden bu yana TENG'in gelişimiyle elektriksel çıktılarında dikkate değler bir artış vardır. Ancak TENG düşük çıkış akımına sahiptir. Çıkış akımının düşük olması TENG'in verimliliğini düşüren bir etkidir. TENG'in çıkış akımını yükseltmek için farklı çalışmalar yapılmaktadır. TENG'in tasarımı, malzeme seçimi, kompozit malzeme üretimi, malzeme kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, TENG katmanlarının sayısı gibi birçok etken üzerinde değışiklik yapılarak çıkış akımı ve TENG performansı iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Katman sayısını arttırarak yapılan çalışmalarda temas eden yüzey alanı artarak yüzey yük yoğunluğunu ve TENG'in çıkış akımının arttığı gözlemlenmiştir (Bai et al., 2013).

2.2. Triboelektrik Nanogeneratörlerin Teorik Temelleri

Elektromanyetik jeneratör ve nanogeneratör, farklı boyutlardaki mekanik enerjiyi verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan iki teknolojidir. Jeneratör ve nanogeneratör kullanılarak enerji dönüşümünün yapılması teorik olarak Gauss yasası, Faraday yasası ve Ampere yasası dahil olmak üzere temel Maxwell denklemlerine dayanır. Çıkış akımı manyetik alanın zaman içerisindeki değışimi ile doğrudan ilişkilidir.

Zhong Lin Wang tarafından ilk olarak 2006'da üretilen piezoelektrik nanogeneratörün ardından 2012'de triboelektrik nanogeneratör üretilmiştir. Bu nanogeneratörler tarafından elde edilen akım, Maxwell'in yer değışirme akımının önemli bir parçası olan yüzey polarizasyon yüklerinin neden olduğu değışen polarizasyon alanı tarafından üretilir (Wang, 2020a). Maxwell denklemleri TENG çıktısını tahmin etmek ve türetmek için kullanılan temel denklemlerdir. Temel fizikte, elektromanyetik jeneratör ve nanogeneratör belirgin şekilde farklı olmasına rağmen bunlar Maxwell denklemleriyle birleştirilmiştir. Yer değışirme akımı ilk olarak 1861'de Maxwell tarafından elektrik yükleri için süreklilik denklemini sağlamak için varsayılmıştır. Maxwell denklemleri:

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

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

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

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

şeklindedir. Denklemden verilen D , elektrik yer değiştirme vektörü olarak adlandırılır. ρ , uzayda serbest yüklerin dağılımı E , elektrik alan büyüklüğü B , manyetik alan yoğunluğu H , mıknatıslama alanını ve J , yük akışının bir sonucu olarak uzayda akım yoğunluğudur. Elektrik alanının mevcudiyeti ile polarizasyonun etkisinin, ortamın hacmi içinde $\rho_b = -\nabla \cdot P$ ve ortam yüzeyinde $\sigma_b = -P \cdot n$ bağıntılarına bağlı olarak yük birikimleri üretir. Burada P , orta polarizasyon vektörüdür ve n , yüzeyin normal yönünün birim vektörüdür. Ortamın polarizasyonundan kaynaklanan alan, sadece sınırlı yüklerin alanıdır.

Nanogeneratörler tarafından üretilen akım Maxwell yer değiştirme akım ile ilgilidir. Bu akım polarize yüzey yükleri nedeniyle polarizasyon alanının değişimine bağlıdır. Maxwell'in yer değiştirme akımı:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, ϵ_0 vakum geçirgenlik katsayısı ve P polarizasyon alanıdır. Yukarıda verilen eşitliğin zamana göre türevi alındığında ifade aşağıdaki gibi olur.

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.6)$$

Burada J_D yer değiştirme akımıdır.

Genel olarak, elektrik alanının mevcudiyeti ile dielektrik polarize olacaktır. Bu ortam polarizasyonunun bir sonucu olan izotropik bir dielektrik ortam için $P = (\epsilon - \epsilon_0)E$ olarak ifade edilir. Genel olarak $E = 0$, olması P 'nin kaybolduğunu gösterir. Böylece $D = \epsilon \times E$

olur ve elektrik alanı yoksa ($E = 0$) yer değiştirme akımının olmadığı veya harici elektrik alanı yoksa polarizasyon olmadığı anlamına gelir.

Bununla birlikte, pratikte polarizasyon, elektrik alanının varlığından bağımsız olan piezoelektrik etki ve yüzey temas-elektriklenmesi gibi etkilerin bir sonucu olarak gerinim alanı tarafından da üretilebilir. Piezoelektrik etkisinin olduğu durumlarda, kristal yüzeylerde gerilimin neden olduğu iyonlar nedeniyle yüzey polarizasyon yükleri oluşur. Triboelektrik etkinin olduğu durumlarda, iki farklı malzeme arasındaki fiziksel temastan dolayı yüzeylerde triboelektrik yükler üretilir. Maxwell denklemlerinde temas elektrifikasyonunun neden olduğu elektrostatik yüklerin yaptığı katkıyı hesaba katmak için, 2017'de Wang tarafından D 'ye ek olarak P_s terimi eklenmiştir (Wang et al., 2017), yani:

$$D' = \epsilon_0 E + P + P_s \quad (2.7)$$

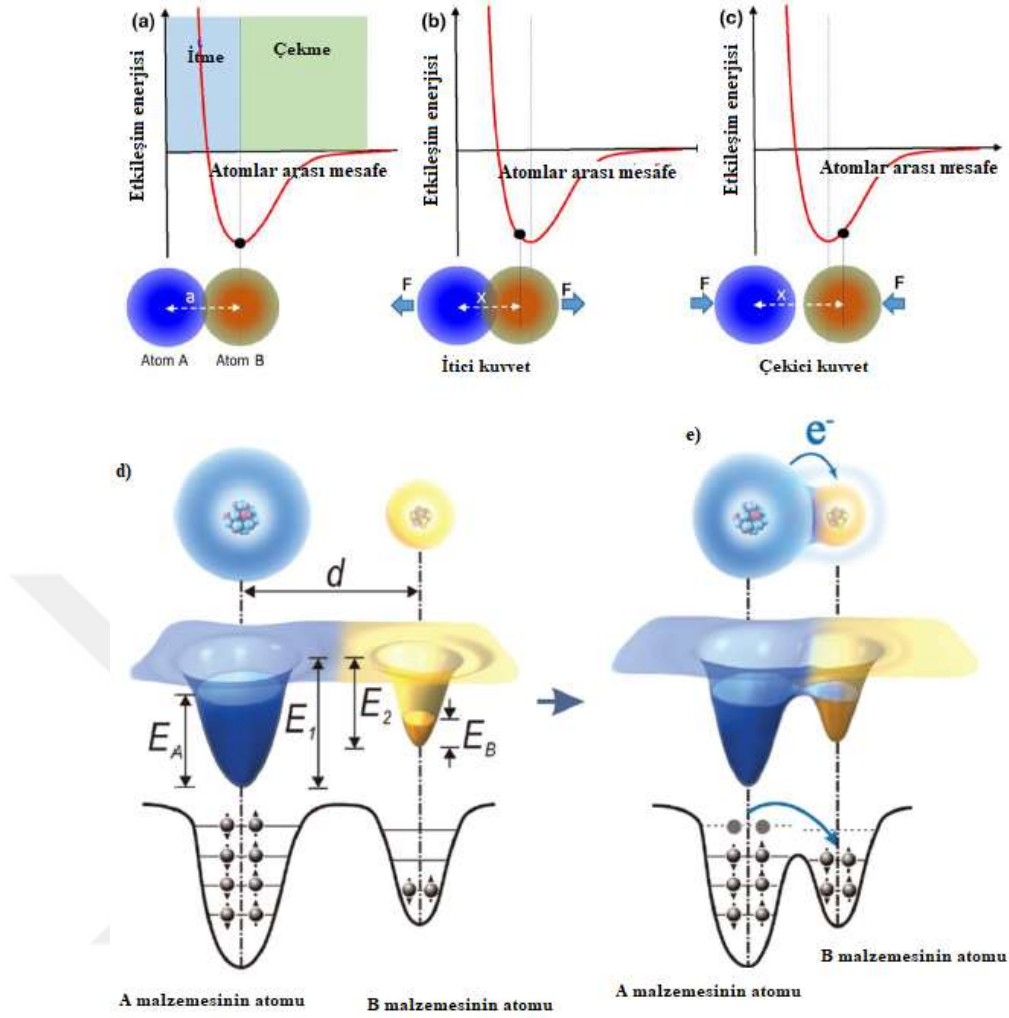
şeklinde ifade edilmiştir. İlk P terimi polarizasyon vektörüdür ve bir dış elektrik alanının varlığından kaynaklanmakta iken eklenen P_s terimi esas olarak elektrik alanının varlığından bağımsız olan yüzey yüklerinin varlığından kaynaklanmaktadır.

2.3. TENG'in Çalışma Prensibi

TENG'in çalışma prensibi sürtünme ile elektrikleymeye dayanır. TENG'e bir kuvvet uygulanması malzemelerin temas etmesine neden olur. Sürtünme katmanlarının yüzeylerinde yük dengesinin bozulmasına ve yüzeylerde aynı miktarda farklı triboelektrik yüklerin (pozitif ve negatif yükler) indüklenmesine neden olur. Yüzeyde meydana gelen yüklenme sonucunda yük dengesini sağlamak için yükler elektrotlar boyunca hareket eder ve bu hareket sonucu bir elektrik akımı oluşur (Yiğit Arkan et al., 2022).

TENG'in katmanları mekanik bir tepkiye maruz kalmadan önce hareketsizdir. Bu nedenle yükler dengededir ve elektrotlar üzerinde bir akım akışı meydana gelmez. İlk olarak TENG'e dışardan bir kuvvet uygulanarak katmanların birbirine temas etmesi ve yüzeylerin zıt kutuplu yüklenmesi yüklenmesi sağlanır. Bu aşamada elektrik potansiyeli olmadığı için bir yük transferi gerçekleşmez. TENG'in katmanlarının tam teması sağlandıktan sonra dış

kuvvet ortadan kalkar. Dış kuvvetin kalkmasıyla katmanlar birbirlerinden uzaklaşmaya başlar ve elektrostatik indüksiyon nedeniyle yük dengesi bozulur. Yük dengenin tekrar kurulmasını sağlamak için elektrotlar üzerinden bir yük akışı meydana gelir. Bu yük akışı anlık bir akım olarak görülür. İki katman arasındaki ayrılma mesafesi tamamlandığında yük dengesi tekrar kurulur ve akım akışı kesilir. TENG'in ayrılmış olan katmanlarına tekrardan bir dış kuvvet uygulanır ve kuvvetin etkisiyle katmanlar birbirlerine doğru yaklaşmaya başlar ve elektrostatik indüklenerek tekrardan yük dengesinin bozulmasına neden olur. Bu aşamada yükler elektrotlar üzerinde hareket ederek ters yönde bir akım akmasına neden olurlar. Son olarak, iki katman tamamen temas ettiğinde yük dengesi kurulur ve elektrotlar üzerinde ki akım akışı kesilir. Katmanlar birbirine tam temas ettiğinde ve katmanların tamamen ayrılması gerçekleştiğinde yüklerin hareketi söz konusu değildir ve devrede bir akım akışı yoktur. Ancak TENG'in katmanları arasında olan yaklaşma ve uzaklaşma hareketi esnasında oluşan elektrik potansiyel farkından dolayı yükler hareket ederek devrede anlık bir akım akışı meydana gelmesine neden olurlar. Şekil 1.2'de TENG'in çalışma prensibi Wang tarafından oluşturulan elektron bulutu potansiyel kuyusu modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.2. İki atom arasındaki etkileşim potansiyeli , (a) denge konumunda, (b) itici bölgede (c) çekici bölgede ve (d-e) elektron bulutu-potansiyel-kuyu modeli (Z. L. Wang, 2020b)

Kontak ayırma modlu TENG’de farklı malzemeler arasında temas elektriklenmesini Wang tarafından oluşturulan ve elektron bulutu potansiyel kuyusu modeli adını verdiği bir model ile açıklamaktadır (Wang, 2020b). Burada elektron bulutları, belirli atomlar veya moleküller içinde uzamsal olarak sınırlandırılmış olan ve belirli atomik veya moleküler orbitalleri işgal eden elektronlar tarafından oluşturulmaktadır. Bir atom, dış kabuk elektronlarının gevşek bir şekilde bağlı olduğu ve atomun veya molekülün bir elektron bulutunu oluşturduğu potansiyel bir kuyu ile temsil edilebilir. d elektron bulutları arasındaki mesafe, E_A ve E_B sırasıyla A ve B malzemelerinin atomlarındaki elektronların işgal edilmiş enerji seviyeleri, E_1 ve E_2 sırasıyla A ve B malzemeleri için elektronların yüzeylerden kaçması için gerekli potansiyel enerjiler olarak belirtilmiştir. Ayrıca $E_1 > E_A$ ve $E_2 > E_B$ olduğu belirtilmiştir. İki malzemenin temasından önce, potansiyel kuyuların

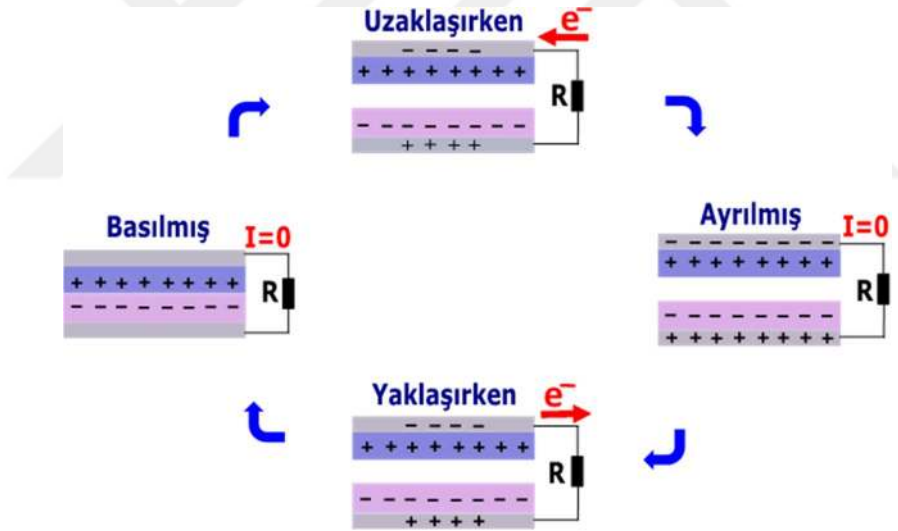
yerel yakalama etkisinden dolayı elektron transferi gerçekleşmez. Yani malzemeler sahip oldukları elektronları yüzeyinde tutarlar. A malzemesi B malzemesiyle temas ettiğinde elektron bulutları üst üste gelir ve böylece tek potansiyel kuyusu asimetrik çift kuyu potansiyeli haline gelir. Çift kuyu potansiyelinin oluşmasından sonra A malzemesinin atomundan B malzemesinin atomuna elektron sıçraması gözlemlenebilir. Sıcaklığa bağlı olarak malzemelerin elektron tutma potansiyelleri de değişmektedir. Bu iki malzemenin ayrılmasından sonra sıcaklığın çok yüksek olmaması durumunda B malzemesinin sahip olduğu E_2 enerji bariyeri B malzemesine aktarılan elektronların çoğu tutulacaktır. Bu temas ayrılma işlemi sonucunda A malzemesi pozitif B malzemesi ise negatif elektronlarla yüklenmiş olur. Bu yüklenmeyi etkileyen en önemli etkenlerden biri uygulanan harici kuvvettir. Uygulanan bu kuvvet miktarındaki artış malzemelerin temas oranında da artış sağlar. Temasın artması ile malzemelerin atomları da birbirlerine yaklaşır ve daha fazla elektron transfer artışa neden olur. Elektron bulutlarında bir bağ oluşturan iki atom arasında, bağ uzunluğu veya atomlar arası mesafe olarak adlandırılan bir denge mesafesi " a " kurulur. İki atom arası mesafe " x " olarak verilmiştir. Şekil 2.2'de de gösterildiği gibi x , a 'dan daha kısaysa iki atom birbirini itme x , a 'dan daha uzunsa iki atom birbirini çekme eğilimindedir. Uygulanan harici kuvvet $x < a$ olması durumunda atomların elektronlarının birbirini itmesi demektir. Bu durum elektron bulutlarının örtüştüğünü yani malzemeler arası elektron transferi olduğunu göstermektedir.

2.4. TENG'in Çalışma Modları

TENG'in katmanlarının bir kuvvete maruz kalmasıyla birbiriyle temas eder. TENG'in katmanlarının hareketiyle temas-ayrılma süreci gerçekleşir. Bu süreçte katmanların yüzeyleri yüklenir ve bu yüklerin hareketi ile elektrik enerjisi üretilir. TENG'in modellenmesi kullanılacağı alana, dielektrik malzemeye ve hareket kaynağına göre yapılır. TENG'in bilinen dört farklı çalışma modu vardır. Bunlar temas ayırma modu, doğrusal kayma modu, tek elektrot modu ve bağımsız triboelektrik katman modudur (Wang, 2014; Wang et al., 2020; Wang, 2017).

2.4.1. Temas Ayırma Modu

Şekil 2.3’de temas ayırma modunun çalışma mekanizması gösterilmiştir. Temas ayırma modu en bilindik ve en çok tercih edilen TENG modudur. Bu modda iki iletken katman, iki farklı dielektrik katman ve iki elektrot bulunur. İlk olarak iletken katmanlar ile dielektrik katmanların bağlantısı yapılır. Sonra ise iletken katmanlar ve elektrotların bağlantısı yapılarak katmanların bağlantısı yapılır. Farklı dielektrik malzemeden üretilen iki katman birbirine paralel olarak üst üste gelecek şekilde konumlandırılır. TENG’e dik bir kuvvet uygulanarak malzeme yüzeylerin teması sağlanır. Bu temas sonucu malzeme yüzeylerinde eşit miktarlarda zıt yükler oluşur. Kuvvetin kalkmasıyla katmanlar ayrılmaya başlar bu süreçte katmanlarda bir yük dengesizliği meydana gelir. Yük dengesini sağlamak için elektrotlardan yük akar (Wang, 2014; Wang et al., 2020; Wang, 2017). Elektrotlarda meydana gelen yük akışı elektrik olarak gözlemlenir.

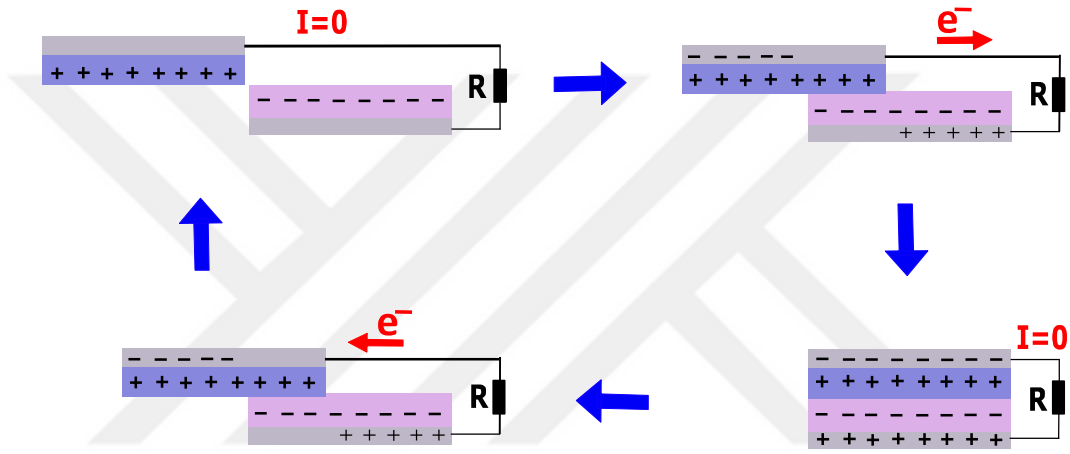


Şekil 2.3. Temas ayırma modunun çalışma mekanizması

2.4.2. Yanal Kayma Modu

Şekil 2.4’de yanal kayma modunun çalışma prensibi gösterilmiştir. Yansal kayma modu, temas ayırma modunda olduğu gibi iki iletken katman, iki dielektrik katman ve iki elektrottan oluşur. Üst üste yerleştirilen katmanların sağa sola hareketi ile elektrik enerjisi üretilir. Temas ayırma modunda üst katman dikey hareket ederken, yanal kayma modunda

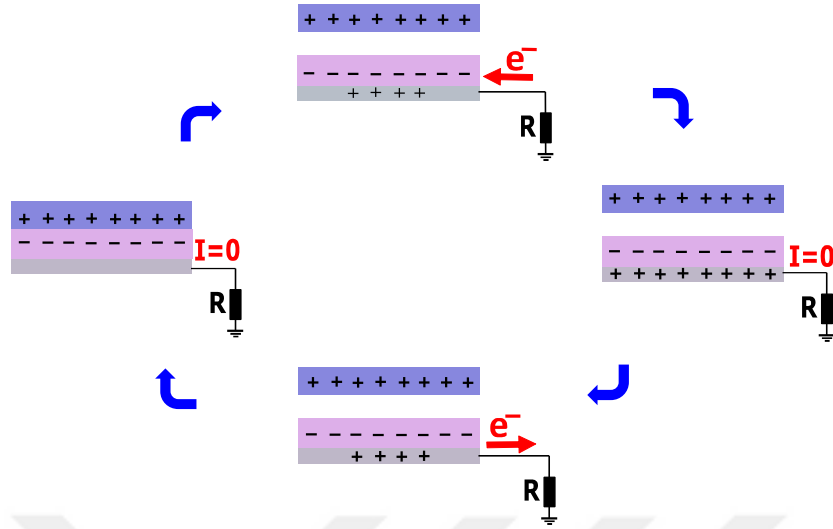
üst katman alt katmana paralel bir şekilde hareket ettirilir. Bu katmanların hareketi esnasında elektrotlar arasında bir elektrik potansiyeli vardır. Üst katman dışa doğru kaymaya başladığında, temas yüzeyi alanındaki azalma nedeniyle düzlem içi yük ayrımı başlatılır. Bu durumda bir elektrottan diğer elektrota yük akışı gerçekleşir ve akım meydana gelir. Ayrılma tamamlandığında yük akışı durur akım akmaz. Üst elektrotun geri hareketi ile katmanlar üst üste gelene kadar ters yönde bir yüklenme meydana gelir ve tekrar bir akım elde edilir. Elde edilen akım, hareketli plakanın hızına göre ve yüzey yük yoğunluğuna değişebilir (Wang, 2014; Wang et al., 2020; Wang, 2017).



Şekil 2.4. Yanal kayma modunun çalışma mekanizması

2.4.3. Tek Elektrot Modu

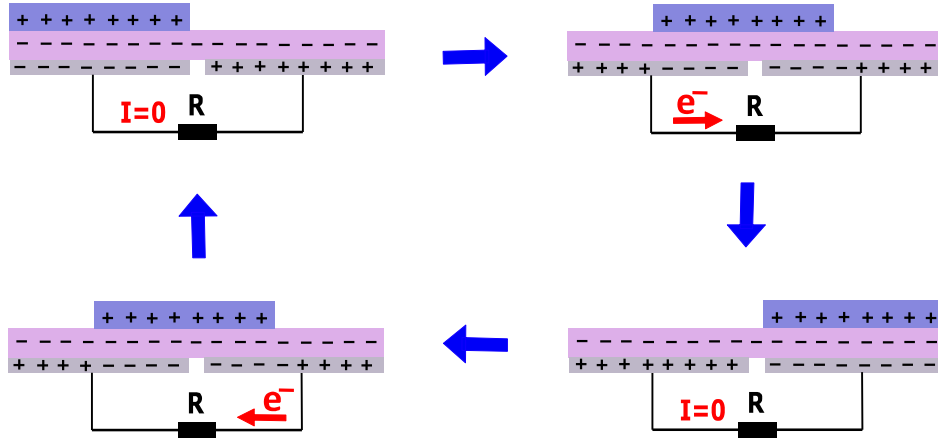
Şekil 2.5’da tek elektrot modunun çalışma prensibi gösterilmiştir. En basit TENG modu tek elektrot modudur. İki dielektrik katman, bir iletken katman ve bir elektrottan oluşur. İletken katmanın üzeri bir dielektrik malzemeye kaplanır ve elektrotla bağlantısı yapılır. Elektrotsuz dielektrik malzeme elektrot bağlantısı olan dielektrik malzemeye temas ettirilerek malzemenin yüzeyinde yük biriktirilmesini sağlar. İki katman ayrılırken ve yaklaşırken bir potansiyel fark oluşur ve yük dengesi bozulur. Yük dengesini kurmak için elektrot üzerinden toprağa bir yük akışı meydana gelir. Ancak bu mod kullanımında çıkış performansı daha düşüktür (Wang, 2014; Wang et al., 2020; Wang, 2017). Tek elektrot modu elle yazma, insan yürüyüşü ve hareketli taşıma gibi serbestçe hareket eden bir mekanik enerji kaynağından faydalanmak için kullanılabilir.



Şekil 2.5. Tek elektrot modunun çalışma mekanizması

2.4.4. Bağımsız Katman Modu

Şekil 2.6’da bağımsız katman modunun çalışma prensibi gösterilmiştir. Bağımsız katman modunda TENG bir sabit dielektrik katman ve farklı polariteye sahip hareketli bir diğer dielektrik katmandan oluşmaktadır. Sabit katman iki adet elektrotun bağlı olduğu iki adet iletken katmanın üzerinde bir adet dielektrik malzemenin yerleştirilmesi ile oluşur. Hareketli katman sadece dielektrik malzemeden oluşmakta ve bu katmana bağlı bir elektrot bulunmamaktadır. Katmanların hareketi yanal kayma modu ile benzerlik göstermektedir. Hareketli katman sabit katmanın iki elektrotu üzerinde paralel olarak hareket eder. Hareketli katmanın ileri geri hareketiyle elektrotlardan yük akışı gerçekleşir (Wang, 2014; Wang et al., 2020; Wang, 2017).



Şekil 2.6. Bağımsız katman modunun çalışma mekanizması

2.5. Malzeme Seçimi

Malzeme seçimi oldukça önem arz etmektedir çünkü seçilen malzemenin triboelektrik özelliklerine bağlı olarak TENG'in çıkış performansı değişmektedir. Bilinen malzemelerin (naylon, deri, ağaç, saç, silikon, kağıt, kumaş, gibi) hepsi triboelektrik etki göstermektedir. Atomik yapılarından dolayı her malzeme farklı elektron ilgisine sahiptir (Zhang and Olin, 2020).

Malzemeler sahip oldukları polariteye göre triboelektrik seri olarak adlandırılan bir dizide toplanır (Zou et al., 2019). Triboelektrik seri oluşturmak için elektroskop adı verilen bir alet kullanılır. Bir triboelektrik seri kullanılacak bir malzemenin diğer malzemelere göre elektron ilgisini, ne kadar hızlı yük biriktirdiği gibi belirli özelliklere göre sıralanmış bir malzeme listesidir. İlk triboelektrik seri 1757'de Johan Carl Wilcke tarafından oluşturulmuştur. Seride malzemeler bir sürtünme sonucu oluşan yük ayrımına göre listelenmiştir. Şekil 2.7'de örnek bir triboelektrik seri gösterilmektedir. Triboelektrik seride seçilen malzemeler birbirlerinden ne kadar uzak olursa temas sonucu oluşan yük miktarı o kadar artar (Zou et al., 2020). Seride yukarı çıkıldıkça malzemeler daha fazla elektron verme eğilimi sergilerken aşağı inildikçe daha fazla elektron çekme eğilimi sergilemektedirler. Malzemeler seride tribo-pozitif ve tribo-negatif olarak ayrılmasına rağmen aynı bölgede seçilen iki malzemedan biri negatif özellik gösterirken karşıdaki malzeme pozitif özellik gösterir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda sentetik ve doğal polimerler eklenmesi ile liste daha da genişletilmiştir. TENG için malzeme seçimi

yapılırken triboelektrik seriyi kullanmak oldukça kolaylık sağlamaktadır (Zhang and Olin, 2020).



Şekil 2.7. Triboelektrik seri

TENG'in çıkış performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri malzemenin triboelektrik potansiyelidir. Malzemenin yüzeyinde biriken yük miktarı malzemelerin elektron kaybetme ve kazanma özelliklerine bağlıdır. İki malzemenin birbirlerine sürtünmesi sonucu malzemelerin yüzeylerinde geçici olarak yük birikmesini sağlar. TENG'in çıkış performansı malzemelerin yüzey yük yoğunluğu doğru orantılıdır. Tribo-malzemeler fiziksel ve kimyasal işlemlere tabi tutularak performansları iyileştirilmeye çalışılır (Nurmakanov et al., 2021). Bu işlemler için farklı yöntemler vardır. Modifikasyonlar nano ölçekte olup oldukça önemlidir nano ölçekte olan bu

modifikasyonların amacı; akan akımı için yüzey yük yoğunluğu, temas alanını için yüzey pürüzlüğü (nano/mikro ölçekte) ve yük yakalama kapasitesi için dielektrik özellik geliştirmektir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzeme Üretimi

TENG üretimi oldukça basit ve ucuzdur. Üretimde kullanılacak malzemeler kolaylıkla temin edilebilir. Özellikle dielektrik malzeme yelpazesi oldukça geniştir. Dünyada var olan malzemelerin hemen hepsi tribo potansiyeline sahiptir. Kimi tribo-negatif özellik sergilerken kimi tribo-pozitif özellik sergiler. Her malzemenin kimyasal yapısı kendine özgü olduğundan polariteleri farklıdır. Bu nedenle kullanılacak malzeme çifti farklı olduğu sürece bir enerji elde edilebilmek mümkündür.

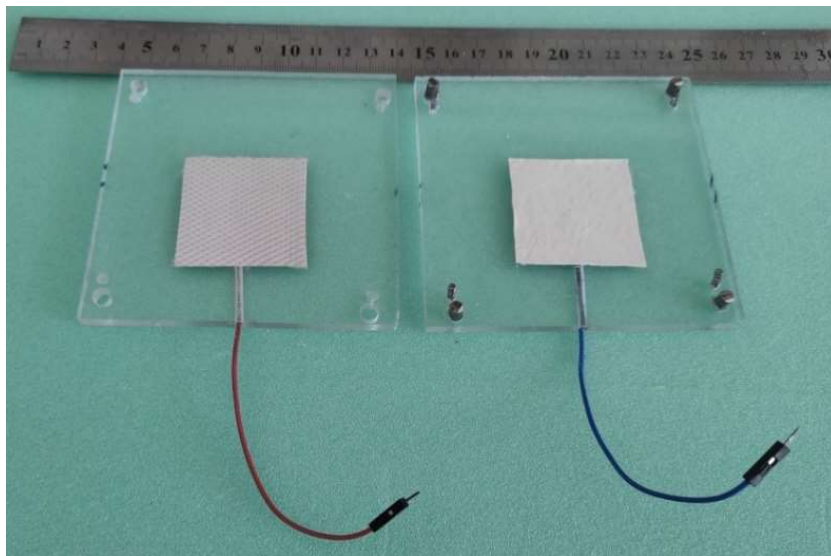
Bu çalışmada TENG üretiminde tribo-negatif olarak silikon ve tribo pozitif olarak cam fiber kullanılmıştır. Bu çalışmada ticari silikon içine Al veya Ti parçacıkları eklenerek iletken parçacıkların silikonun performansına etkisi gözlemlenmiştir. Silikon malzemesinin içerisine Al veya Ti parçacıkları eklenip mikser yardımıyla homojen bir kıvam elde edilene kadar karıştırılmıştır. Silikon üretiminde Doctor Blade tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle kalıplar üzerine dökülen silikon karışımlarının kalıptan taşan miktarı temizlenip ve düz bir yüzey elde edilmiştir. Kalıplara dökülen silikonlar 12 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır.

İlk olarak silikonun optimum kalınlığını belirlemek için 4x4 cm² ölçülerinde ve 0,45, 0,55, 0,65, 0,75, 0,85, 1,00, 1,20 mm kalınlıklarda kalıplar hazırlanmıştır. Bu kalıplar şeffaf asetat kâğıtları üst üste dizilerek hazırlanmıştır. Kalıpların üzeri iletken tabaka olarak kullanılacak olan alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Daha sonra kalıpların üzerine ağırlıkça %2,5 Al veya ağırlıkça %2,5 Ti iletken parçacıkları katkılı silikonlar dökülmüştür. Şablon üzerindeki fazla silikon sıyrma bıçağı ile temizlenmiştir.

Daha sonra optimum katkı oranını belirlemek için ağırlıkça % 0, %1, %2,5, %5, %10 Al veya Ti parçacıkları silikonlara eklenerek homojen karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen homojen karışımlar hazırlanan şablonlara dökülmüştür. Fazla malzeme sıyrma bıçağı yardımıyla temizlenerek düz bir yüzey elde edilmiştir.

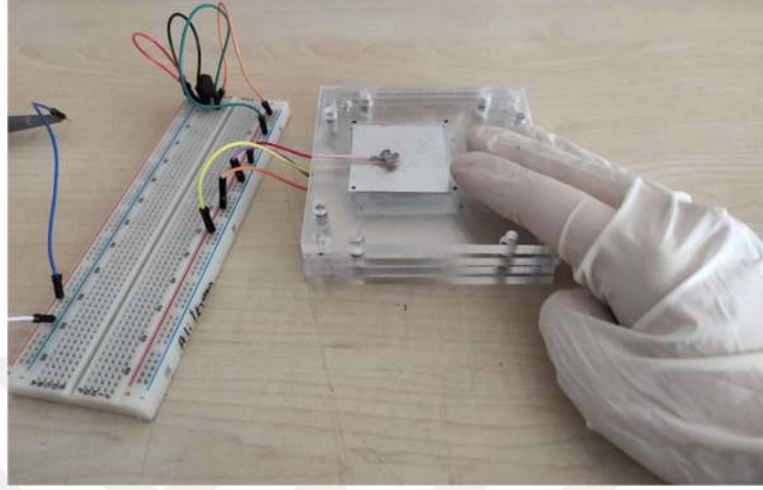
3.2. TENG İmalatı

Çalışmada dikey ayırma modlu TENG kullanıldı. Pleksiglass fiyat bakımından uygun, hafif, kolay ulaşılabilir, kırılmaz ve dayanıklı olması nedeniyle TENG üretiminde dış katman olarak kullanım açısından oldukça uygundur. Dış katman olarak 90 mm × 90 mm × 5 mm boyutlarında iki adet Pleksiglass kesildi. Her iki pleksiglassa matkap yardımı ile tam ortadan 4 mm ve yan taraflarından 1 mm yarıçapında, 45 mm uzunluğunda olmak üzere birer delik açıldı. Yandan açılan deliklere elektrot olarak kullanılacak kablolar yerleştirildi ve lehimlendi. Lehimlenen bu kısım iletken katmanla temas noktası olduğundan taşan lehim temizlenerek lehimin kullanılacak malzemeye zarar vermesi önlendi. TENG'in çalışma süresi boyunca kaymasını önlemek amacıyla alt ve üst katman olarak kullanılan pleksiglassların dört köşesine mil yerleştirmek üzere delikler açıldı ve 7 mm çapında 4 adet mil ile birbirine monte edildi. Alt ve üst katmanda her milin etrafına 1 adet toplamda 4 adet olmak üzere çelik yaylar yerleştirilmek üzere matkap yardımıyla delikler açıldı ve yaylar yerleştirildi. Bu yaylar TENG'e geri esne özelliği verirken aynı zamanda katmanlar arası ayırma mesafesini ayarlamaya olanak sağlar. Kullanılan triboelektrik malzemeler 40 mm × 40 mm boyutlarında kesildi. Alt pleksiglass katmana tribo-negatif malzeme olan silikon, üst katmana ise tribo-pozitif malzeme olarak cam fiber yerleştirildi. Yerleştirilme sırasında bu malzemelerin iletken katmanı olan alüminyum folyo ve elektrotların teması sağlandı. Silikon bazlı üretilen bir TENG modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Triboelektrik nanogeneratör

Son olarak en iyi çıkış performansı sergileyen Al veya Ti katkılı silikondan oluşan TENG'ler çok katlı olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Çok katlı TENG tasarımı

3.3. Karakterizasyon

Silikon bazlı dielektrik katmanların mikro ve kristal yapıları hakkında bilgi almak için X-ışını kırınım (XRD) Cu-K α radyasyon kaynağı ($\lambda = 0.15406 \text{ \AA}$) ile bir Bruker D8 Advance kullanılarak elde edildi. Yüzey morfolojileri Keyence VHX 900F optik mikroskop ve Zygo ZeGage optik profil oluşturucu ile analiz edildi. Voltaj ölçümü, 10 M Ω dahili dirençli (Rin) Rigol DS4014 osiloskop ile yapıldı. TENG'i şarj etmek için özel olarak imal edilen yorulma cihazı kullanıldı.

3.3.1. X-Işını Difraksiyonu (XRD)

X-ışını kırınım analizi (XRD), bir malzemenin kristalografik yapısını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. XRD yöntemi ile ölçüm yapmak için cihazın merkezine bir malzeme yerleştirilir ve bu malzeme üzerine X-ışınları gönderilir ve daha sonra malzemeyi terk eden X-ışınlarının yoğunluklarını ve saçılma açılarını ölçerek malzeme içeriği hakkında bilgi elde edilir. XRD yöntemi hasarsız bir ölçüm işlemidir. X-ışınları, nanometre cinsinden ölçülebilen dalga boylarını içeren bir elektromanyetik radyasyon biçimidir. X-

ışını ve dedektör aynı anda hareket eder. Malzemelerin çoğu birçok küçük kristalden oluşur. XRD kristal fazları, yapısal özellikleri ve atomik boşlukları incelemek için bir teknik olarak kullanılır. Numuneden gelen sinyal numunenin atomik yapısı ilgili piklerin gözlemlendiği açıda kaydedilir.

3.3.2. Optik Mikroskop

Bir malzemenin yüzey yapısı hakkında bilgi veren bir cihazdır. Optik mikroskobun objektif merceği çok güçlü bir büyüteç gibidir. Kısa odak uzaklığına sahip bir lenstir ve bu nedenle incelenen örneğe yakın tutulmalıdır. Bu, numuneden gelen ışığın mikroskop tüpünün içinde odak noktasına gelmesini sağlayarak numunenin büyütülmüş ve ters çevrilmiş bir görüntüsünü oluşturur. Objektif merceğin yarattığı gerçek görüntü, bir kişinin onu görebilmesi için oküler mercekle tarafından daha da büyütülür. Görüntünün netliği odak düğmesi yardımıyla yoğunlaştırıcı ve ışık yoğunluğunu ayarlanarak artırılabilir.

3.3.3. Optik Profil Oluşturucu

Optik Profil cihazları mikro ve nano ölçekte hassas, nicel, ISO uyumlu, temassız yüzey karakterizasyonu sağlar. Yüksek çözünürlüklü görüntü sensörü mükemmel yüzey detaylandırması ve görselleştirme için saniyeler içinde hızlı alan ölçümleri sağlar. Çok kısa süre içinde oldukça fazla veri noktasını yakalama kabiliyetine sahiptir. Uygulamalar pürüzsüz veya son derece pürüzlü, dağınık yapı ve 3B baskılı yüzeylere kadar değişen örnekler üzerinde topografya ve yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapı karakterizasyonuna kadar uzanır. Optik Profil Oluşturucu malzemenin yüzey dokusunu formunu, adım yüksekliğinin ve 2B/3B profil oluşturma dahil olmak üzere çok çeşitli yüzeyleri ve bu yüzeylere bağlı parametreleri ölçer.

3.3.4. Osiloskop

Bir osiloskobun temel amacı, bir elektrik sinyalini dalga biçiminde görüntülemek ve analiz etmektir. Zamanın bir fonksiyonu olarak bir veya daha fazla sinyalin anlık gerilimi ölçülüp görüntülenmesine olanak sağlar. Osiloskop genel olarak kullanımında X ekseninde zaman, Y ekseninde gerilim olmak üzere iki boyutlu bir grafik üretir. Gerilim aynı zamanda

multimetre kullanılarak da ölçülebilir ancak bu ölçümler dijital olarak yapılırken osiloskop dijital ölçümünün yanında gerilimin zamanla değişiminin grafiğinin anlık olarak gözlemlenmesine olanak sağlar. Ayrıca multimetre gerilim, akım ve direnci ölçebilirken osiloskop voltajı ölçerek ölçülen voltaj ile ilgili parametreler hakkında bilgi verir.

Bir elektronik cihazın gerilime bağlı ölçümleri yapılırken osiloskobun iç direncine ve devreye bağlanan dirençler göz önüne alınır. Gerilim ölçümü yapılırken ohm yasasından faydalanılır.

3.3.5. Yorulma Cihazı

Yorulma cihazı TENG’i farklı frekans aralıklarında ve farklı kuvvetler altında çalıştırmak için kullanılan bir makinedir. Şekil 3.3’de bu amaç doğrultusunda özel olarak üretilen bir yorulma cihazı gösterilmektedir. Yorulma cihazı TENG’lerin sabit frekans ve belirli bir kuvvet altında çalışmasını ve enerji üretmesine olanak sağlar. Ayrıca bu makine kullanılarak TENG’lerin uzun süreli performansı ve dayanıklılığı test edilebilir. Bu makinede uygulanan kuvvetin büyüklüğünü ve frekansı değiştirilebilir. PLC kontrolüyle frekans ayarı yapılır.



Şekil 3.3. Yorulma Cihazı

3.4. Deneyler

Üretilen TENG'lere yaklaşık 20 N'luk bir kuvvet uygulayarak katmanların teması sağlanmıştır. TENG'in hasat edebileceği kaynaklar genel olarak düşük frekansa sahiptir. Bu nedenle üretilen TENG'lerin hepsi düşük frekans aralığında çalıştırılmıştır. TENG'in çalışma frekans aralığı 2 Hz olarak ayarlanmıştır. TENG tarafından üretilen voltajı ölçmek ve görüntülemek için Rigol DS4014 osiloskop kullanılmıştır. TENG'in yapılan tüm elektriksel ölçümlerinde devreye bir köprü diyot bağlanmıştır. Bağlanan bu köprü diyot sinyali doğrultarak anlık voltajın tek yönlü ölçülmesine ve TENG'in ürettiği elektrik enerjisinin depolanabilmesine olanak sağlamaktadır. TENG'in şarj kapasitesini ölçmek için devreye köprü diyot üzerinden farklı kapasiteler bağlanılmıştır. TENG'lerin maksimum güç çıkışını ölçmek için devreye farklı büyüklükte yük dirençleri bağlandı. Farklı yük direnci altında TENG'lerin güç çıkışları hesaplanırken, ölçüm cihazının iç direnci ($R_{in} = 10 \text{ M}\Omega$) dikkate alınmıştır. Devreye bağlanan dirençlerin eşdeğer direncin $10 \text{ M}\Omega$ 'dan daha küçük olduğunda ölçüm cihazı devreye paralel, eşdeğer direncin $10 \text{ M}\Omega$ 'dan büyük olduğu durumlarda ölçüm cihazı devreye seri bağlanmıştır. Şekil 3.4'de dirençlerin TENG'e bağlı olduğu devreye seri ve paralel şekilde nasıl bağlantı şeması gösterilmiştir. Son olarak çok katlı TENG yapısının (Şekil 3.2) çıkış akımı üzerindeki etkisini görmek için TENG'in çok katlı voltaj, kapasite ölçümleri de alınmıştır.

Dirençler paralel bağlandığında ölçü aleti de devreye paralel bağlanır. Bu durumda ölçüm cihazından okunan voltaj değeri (V_m) TENG elektrotları arasındaki voltaja ($V_m = V$) eşittir. Ölçü aleti devreye seri şekilde bağlandığında ölçüm cihazından okunan gerilim değeri sadece cihazın iç direnci üzerine düşen gerilim değeridir. Bu ölçüm cihazından okunan voltaj değerin (V_m) TENG elektrotları arasındaki voltaja ($V_m \neq V$) eşit olmadığını gösterir. TENG'in anlık voltaj, anlık akım ve güç değerlerinin hesaplamaları ölçüm aletinin seri ya da paralel bağlanmasına göre değişir. Dirençlerin devreye seri bağlı olduğu durumdaki hesaplamalar:

$$R_{es} = R_{in} + R_s \quad (3.1)$$

$$I = \frac{V_m}{R_{es}} \quad (3.2)$$

$$P = I^2 R_{eş} \quad (3.3)$$

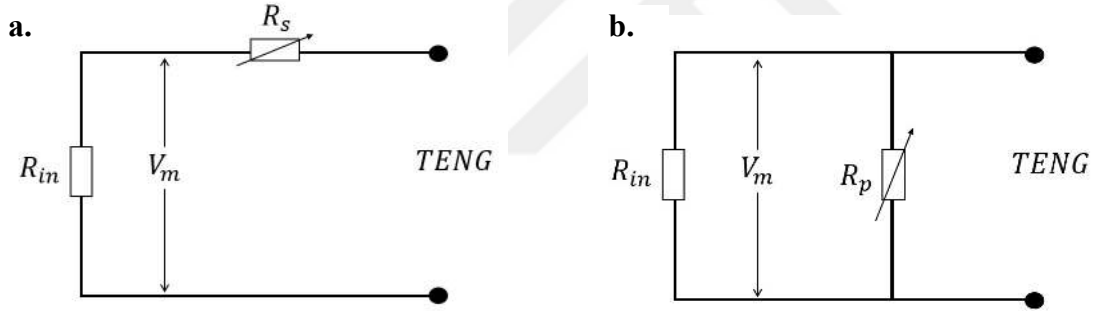
Dirençlerin devreye paralel bağlandığı durumlarda hesaplamalar:

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

$$I = \frac{V_m}{R_{in}} \quad (3.5)$$

$$V = V_m + I R_{eş} \quad (3.6)$$

$$P = \frac{V_m^2}{R_{eş}} \quad (3.7)$$

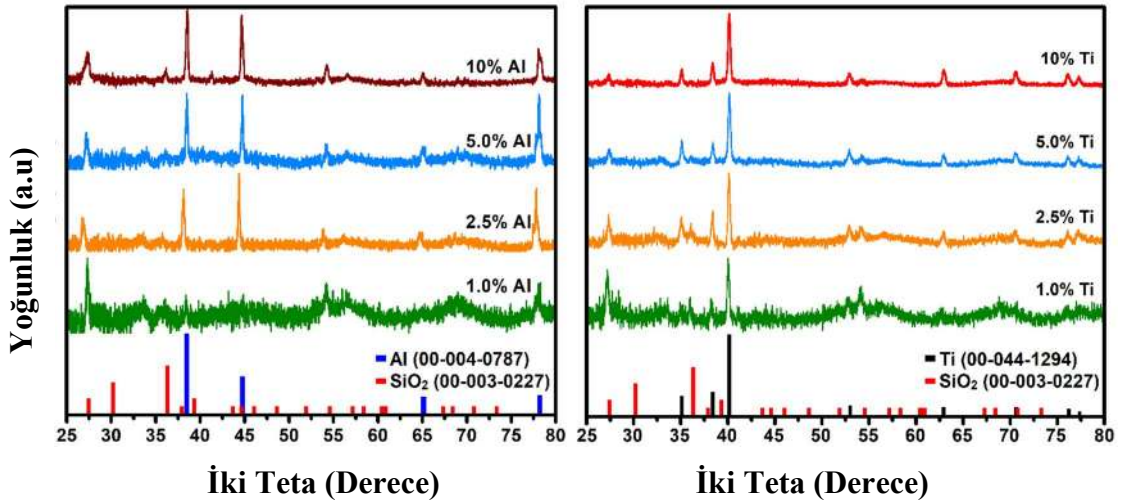


Şekil 3.4. Dirençlerin TENG devresine (a) seri ve (b) paralel bağlantısı şeması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Malzeme Karakterizasyonu

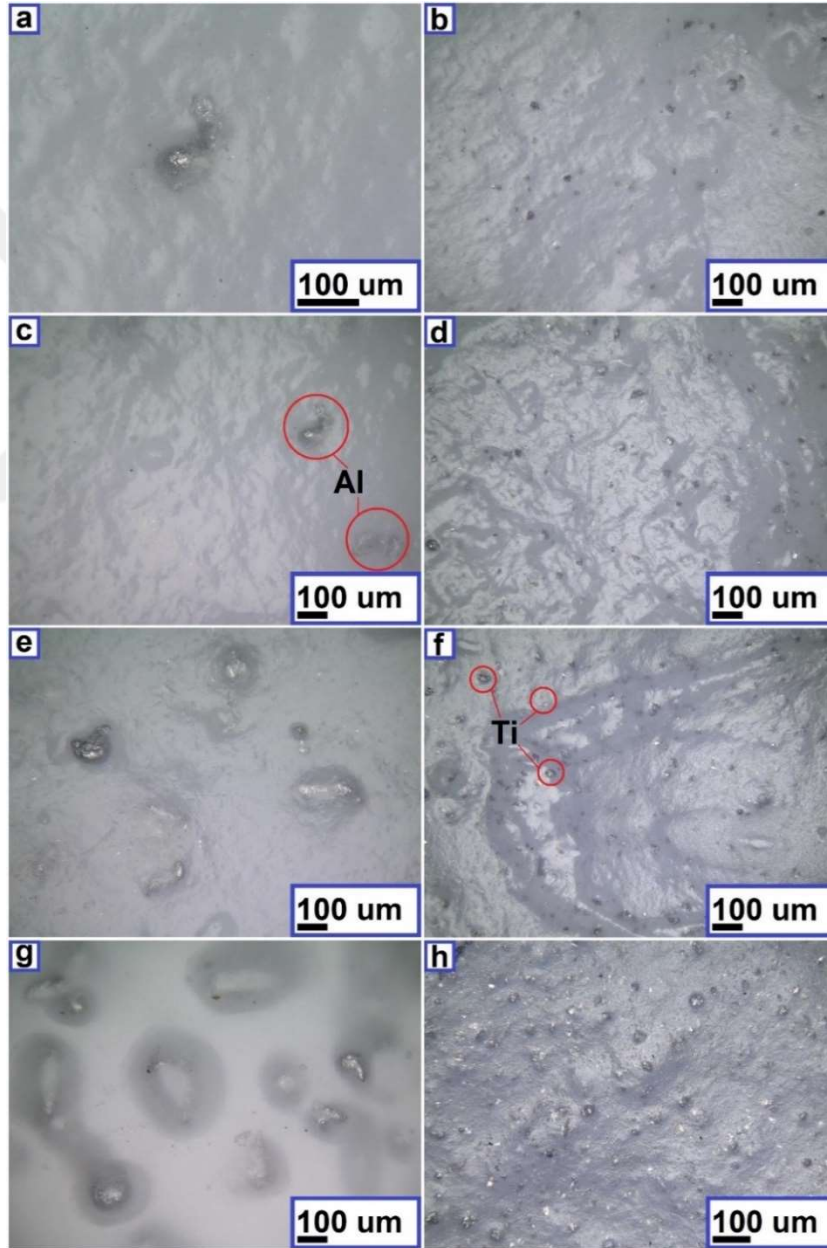
Dielektrik malzemelerin faz analizleri XRD karakterizasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de verilmiştir (Okbaz et al., 2022). Görüldüğü üzere kullanılan silikon dolgu macunu ortorombik kristal yapıya sahip SiO_2 'den oluşmaktadır. Ayrıca, her iki tip dielektrik malzemenin XRD sonuçları, silikon dolgu macununda farklı oranlarda kullanılan katkı malzemelerinin varlığını göstermiştir. Gömülü malzemelerden biri olan toz alüminyum, Fm-3 m (2 2 5) boşluk grubu ile kübik kristal yapıya sahipken, toz titanyum altıgen kristal yapıya sahiptir (P63/mmc (1 9 4)). Ayrıca, gömme oranı arttıkça yarı amorf desendeki pikler daha yoğun ve net hale gelir. Bu, iletken parçacık gömme işleminin homojen yapıldığının bir göstergesidir. Ayrıca, XRD piki, silikon dolgu macunu ve gömülü malzemelerin karakteristik pikleri dışında bulunmamaktadır.



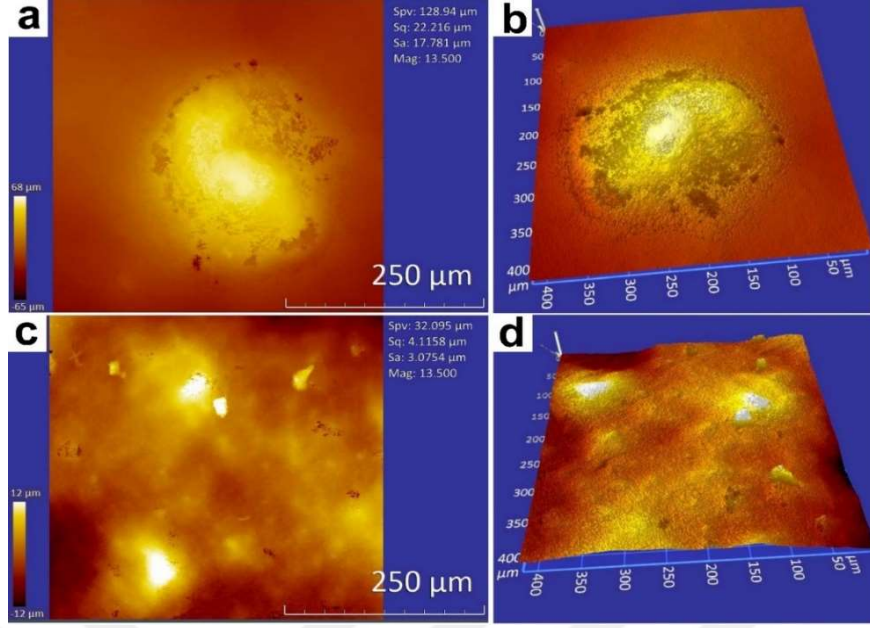
Şekil 4.1. Farklı oranlarda Al ve Ti katkılı silikonların XRD aracılığıyla karakterizasyonu

Dielektrik malzemelerin yüzey morfolojileri optik mikroskop ve optik profilometre ile incelenmiştir. Gömme oranına bağlı olarak silikon esaslı dielektrik katmanlarda gömülü malzemelerin artışı açıkça görülmektedir. Katkılanan bu malzemeler silikon dolgu

macununda homojen olarak dağılmıştır (Şekil 4.2). Ayrıca, dielektrik katmanlardaki Al ve Ti boyutları sırasıyla $\sim 142 \mu\text{m}$ ve $\sim 25 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür ve bu ölçümlerin topografik görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Ayrıca, S_{pv} (tepeden vadi yüksekliğine), S_a (yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalama sapması) ve S_q (yüzey topografyasının kök ortalama kare sapması) pürüzlülük değerleri Al için sırasıyla $128,94 \mu\text{m}$, $17,781 \mu\text{m}$, $22,216 \mu\text{m}$ iken Ti için sırasıyla $32,095 \mu\text{m}$, $3,0754 \mu\text{m}$, $4,1158 \mu\text{m}$ 'dir. Bu sonuçlar partikül boyutlarıyla uyumludur.



Şekil 4.2. Optik Mikroskop altında Al (a, c, e, g) ve Ti (b, d, f, h) katkılı silikonun ((a, b) ağırlıkça %1, (c, d) ağırlıkça %2,5, (e, f) ağırlıkça %5 ve (g, h) ağırlıkça %10) görüntüleri



Şekil 4.3. Optik Profil Oluşturucu altında (a-b) Al, (c-d) Ti katkılı dielektrik malzemelerin yüzey morfolojisi ve 3 boyutlu topografik harita görüntüleri

4.2. Elektriksel Ölçümler

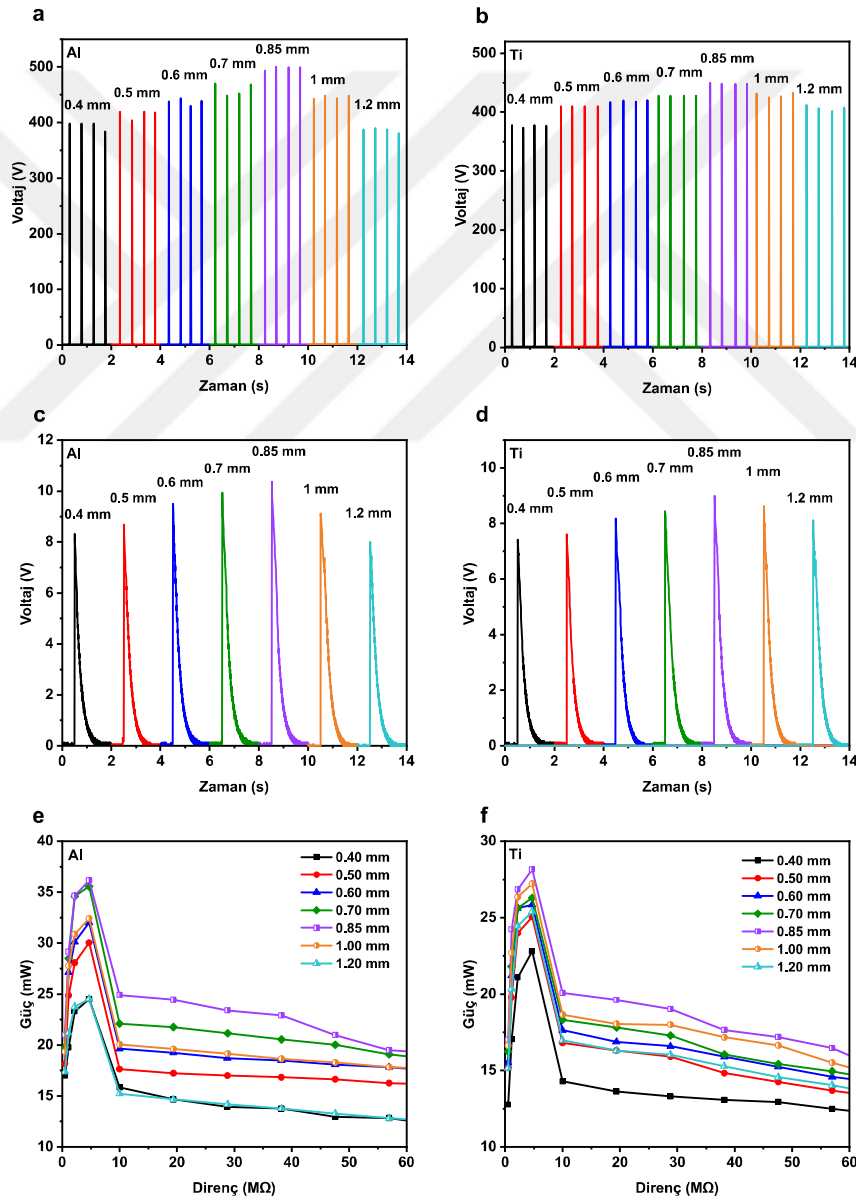
TENG, kullanım alanlarına ve kullanılan malzemenin tipine göre kontak ayırma, dikey temas-ayırma, tek elektrotlu ve bağımsız katman modu olmak üzere dört farklı modda tasarlanabilir. En bilindik ve en yaygın olan TENG modu kontak ayırma modudur. Bu mod tasarımının kolaylığı, yüksek verimliliği ve sağlamlığı nedeniyle çoğunlukla tercih edilir. Dielektrik malzemeler başlangıçta birbirleriyle temas etmedikleri için yüksüzdürler. Farklı polariteye sahip malzemeler bir dış kuvvet tarafından birbirleriyle temas ettirildiğinde, malzemelerin yüzeylerinde zıt polaritede elektrostatik yüklenme meydana gelir. Katmanların teması boyunca yükler dengededir. Uygulanan dış kuvvet ortadan kalktığında triboelektrik malzemeler birbirinden ayrılırlar. Bu süreçte elektrostatik denge bozulur. Elektrostatik dengenin bozulması bir yük hareketi meydana getirerek elektrotlarda bir akım akmasına neden olur. Ayırma işlemi tamamlandığında elektrostatik alan tekrar kurulur ve elektrotlar üzerindeki akım akışı kesilir. TENG'e tekrar bir dış kuvvet uygulandığında katmanlar arasındaki mesafe azalmaya başlar ve yükler arasındaki denge bozulmasına neden olur. Yükler arasındaki bozulan denge ters yönde bir akıma neden olur. Bu işlem devam ettikçe TENG'in katmanları hareketliken (yaklaşırken/uzaklaşırken) elektrotlar üzerinden akım akışı meydana gelir. Ancak katmanlar sabit iken yükler dengede olduğundan bir akım akışı söz konusu değildir.

Kullanılan osiloskobun iç direnci $10\text{ M}\Omega$ 'dur. Bunun anlamı yüksüz yapılan ölçümler $10\text{ M}\Omega$ yük altındaki ölçümlere eşittir. Tablo 4.1'de ölçülen ve Denklem (3.1)-(3.7) kullanılarak hesaplanan veriler sırasıyla verilmiştir (Okbaz et al., 2022). Silikon içerisine ağırlıkça %2,5 oranında Al veya Ti metal parçacıklar eklenmiştir. İlk olarak iletken parçacık katkılı silikonların voltaj çıktıları incelenmiştir. Şekil 4.4 (a)'da cam fiber ve farklı kalınlıklarda %2,5 Al katkılı silikondan yapılmış TENG'lerin anlık voltajları gösterilmiştir. Al katkılı silikondan üretilen TENG'ler arasında en iyi anlık voltajı 0,85 mm kalınlığına sahip olan TENG'in sergilediği belirgin bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.4 (b)'de cam fiber ve farklı kalınlıklarda ağırlıkça %2,5 Ti katkılı silikondan üretilmiş TENG'lerin anlık voltajları gösterilmektedir. Anlık voltajın 0,85 mm kalınlığa kadar kademeli olarak arttığı sonrasında ise düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir. Bu düşüşün nedeni olarak 0,85 mm'den sonra malzeme kalınlığındaki artışın elektrik alan şiddetini azalttığı söylenebilir.

İkinci olarak metal parçacıkları katkılı olan farklı kalınlıklardaki silikondan yapılmış TENG'lerin bir darbeye karşılık gelen kapasitör şarj-deşarj ölçümleri yapıldı. Şekil 4.4 (c)'de cam fiber ve farklı kalınlıklarda %2,5 Al katkılı silikondan üretilmiş TENG'lerin şarj-deşarj eğrilerini gösterilmektedir. Şarj-deşarj süresini kısa bir zaman diliminde gözlemleyebilmek için $0,022\text{ }\mu\text{F}$ 'lık kapasitör kullanılmıştır. Kapasitör gerilimleri anlık voltajlar ile uyumludur. Anlık gerilimlerinde olduğu gibi burada da 0,85 mm kalınlığında en iyi sonuç elde edilmiştir. Şekil 4.4 (d)'de ağırlıkça %2,5 oranında Ti katkılı silikondan üretilmiş TENG'lerin şarj-deşarj eğrileri gösterilmektedir. Kapasite gerilimi 0,85 mm kalınlığa kadar artmıştır. Kapasite geriliminde 0,85 mm kalınlığından sonra düşüş görülmektedir. Kapasitör gerilimi maksimum 8,9 V olarak ölçülmüştür. Ölçülen kapasitör gerilimleri çıkış gerilimleri ile uyumludur.

Son olarak Al ya da Ti katkılı silikonların maksimum güç eğrileri verilmiştir. Şekil 4.4 (e)'de % 2,5 oranında Al katkılı silikondan üretilen TENG'ler için farklı yük altında maksimum güç eğrileri verilmiştir. Grafikteki eğrilere bakıldığında 0,85 mm kalınlığındaki Al katkılı silikonun $4,7\text{ M}\Omega$ 'luk yük altında en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Al gömülü silikonun kalınlığının 0,85 mm'ye kadar çıkış gerilimini arttırdığını 0,85 mm'den sonra düşürdüğü gözlemlenmiştir. Al katkısı için anlık voltaj, şarj-deşarj ve güç değerleri göz önüne alındığında ayırt edici optimum kalınlık 0,85 mm olmuştur. Şekil 4.4 (f)'de Ti iletken parçacık katkılı silikondan üretilen TENG'lerin farklı

yük altında güç eğrileri verilmiştir. Yük artışı ile ters orantılı olarak akım düşmektedir. Yükteki artış gerilimi belli bir noktadan sonra sınırlayabildiğinden maksimum güç noktasına kadar güç artmakta sonrasında düşmektedir. Silikona %2,5 oranında Al veya Ti iletken parçacıkları eklenerek üretilen TENG için optimum kalınlık 0,85 mm olarak belirlenmiştir. 0,85 mm kalınlığı için Al parçacıklı silikonun çıkış gerilimi, kapasitör gerilimi ve maksimum güç noktası sırasıyla 500 V, 10,4 V ve 36,2 mW iken Ti parçacıklı silikonun çıkış gerilimi, kapasitör gerilimi ve maksimum güç noktası sırasıyla 450 V, 8,90 V ve 28,1 mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Ti veya Al katkılı silikonun kalınlığa bağlı olarak (a-b) çıkış gerilimleri, (c-d) şarj-deşarj eğrileri (e-f) maksimum güç eğrileri

Tablo 4.1. Farklı kalınlıklarda Al veya Ti katkılı silikondan yapılan TENG'ler için elektriksel değerleri

	Kalınlık (mm)	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	1,00	1,20
%2,5 Al katkılı silikon	Çıkış gerilimi (V)	398	420	443	470	500	448	390
	Kapasitör gerilimi (V)	8,32	8,68	9,50	9,93	10,4	9,12	8,00
	Maksimum güç (mW)	24,5	30,1	32,0	35,6	36,2	32,4	24,5
	Güç yoğunluğu (W/m ²)	15,3	18,8	20,0	22,2	22,6	20,3	15,3
%2,5 Ti katkılı silikon	Çıkış gerilimi (V)	378	410	420	428	450	432	412
	Kapasitör gerilimi (V)	7,42	7,60	8,17	8,45	8,90	8,64	8,13
	Maksimum güç (mW)	22,8	25,0	25,9	26,3	28,1	27,2	25,4
	Güç yoğunluğu (W/m ²)	14,3	15,7	16,2	16,4	17,6	17,0	15,9

TENG'in performansını etkileyen üç temel parametre vardır. Bu üç parametreyi kullanarak kurulan denklemler TENG'in elektrik çıktısı hakkında bilgi verir. Denklemler V-Q-x olmak üzere üç parametreden oluşur. Bu üç parametre elektrotlar arasındaki voltaj (V), aktarılan yük miktarı (Q) ve triboelektrik malzemeler arasındaki mesafedir (x(t)). Temas ayırma modunda pozitif dielektrik ve negatif dielektrik kullanılarak üretilen TENG için V-Q-x denklemi aşağıdaki gibidir (Niu et al., 2013) :

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

Açık devre koşullarında ki voltaj (Niu et al., 2013):

$$V_{OC} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (4.2)$$

Kısa devre koşullarında voltaj 0 kabul edilir. Bu nedenle aktarılan yük (Niu et al., 2013):

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

Ve buna göre elektriksel akım (Niu et al., 2013):

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

d_0 parametresi (Niu et al., 2013):

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

olarak hesaplanır.

Devreye yük bağlandığında denklemler aşağıda verilen şekilde (Niu et al., 2013) yeniden düzenlenebilir.

$$V = IR = \frac{dQ}{dt} \quad (4.6)$$

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

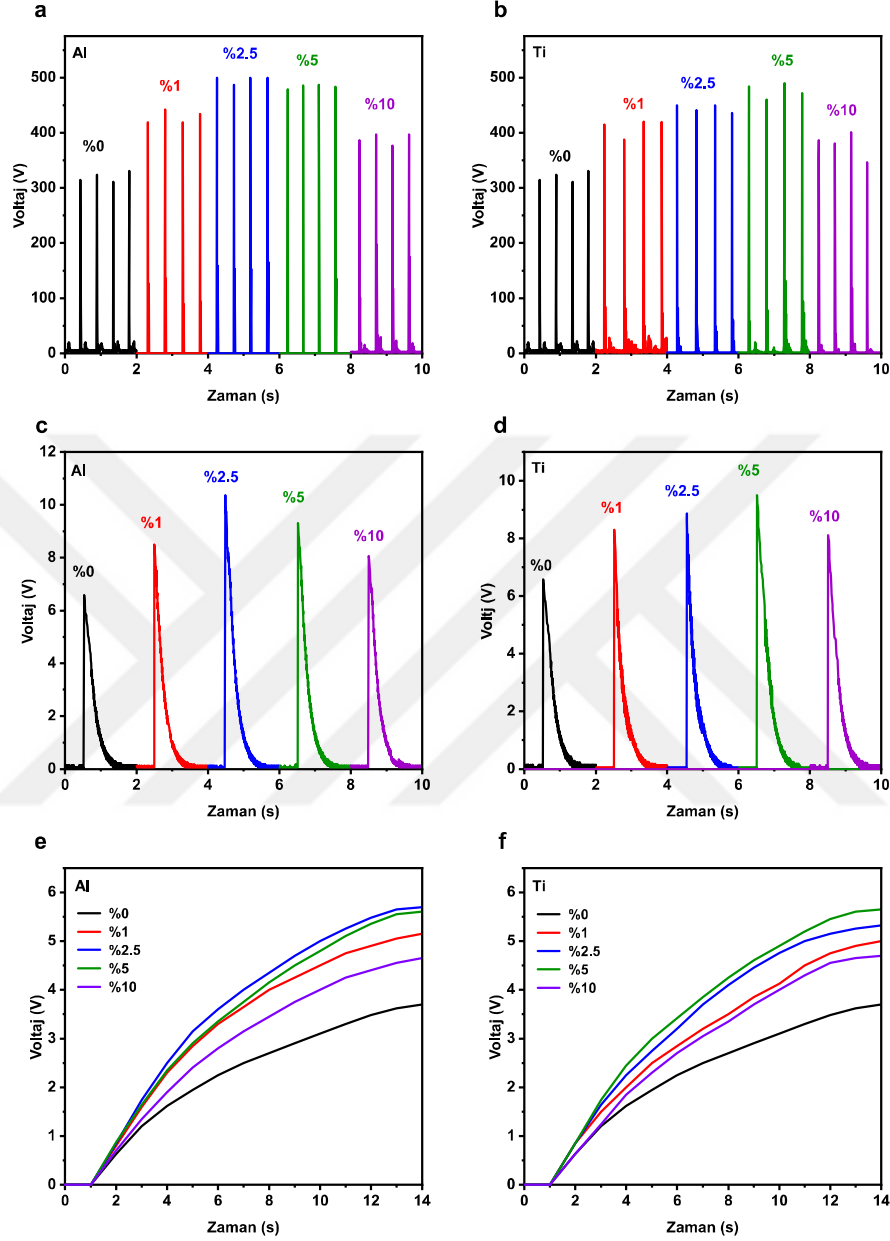
Yukarıdaki denklemler triboelektrik malzemelerin boyutu, karakteristikleri, TENG'in hareket hızı dikkate alınarak farklı yük dirençleri altında gerçek zamanlı voltaj, akım ve güç değerlerini hesaplamamıza olanak sağlar. Bu denklemler aynı zamanda TENG boyutlarını ve malzeme özelliklerini optimize etmek ve mümkün olan en yüksek çıkış gücüne sahip bir TENG üretmek için bir kılavuz olarak kullanılabilir. Dielektrik malzeme kalınlığına (d_1 ve d_2) bağlı olarak Al veya Ti katkılı silikondan üretilen TENG'lerin voltaj ve güç değerleri önce artmış ve sonra azalmıştır. Ancak Denklem (4.1)'e göre, malzeme kalınlaştıkça voltaj değerlerinin düşmesi beklenir. Ayrıca (4.3), (4.4) ve (4.7)'nci denklemlere göre malzeme kalınlığı arttıkça devredeki akım değerinin de düşmesi beklenir. 0,85 mm'lik kritik triboelektrik katman kalınlığına kadar TENG performansındaki artış,

farklı bir parametrenin değişmesine, yani malzemenin gerilmesine atfedilebilir. Malzemenin kritik kalınlığa kadar gerilmesinin artmasıyla temas yüzeylerinde meydana gelen deformasyon sonucu daha fazla yüzeyin temas etmesine neden olur (Lv et al., 2021). Böylece temas eden yüzeylerde daha fazla yük değişimine neden olur. Temaslı elektrifikasyon bir yüzey olayı olduğundan, elektron transferi sadece iki katı malzeme arasındaki atomlar arası mesafe itici bölgedeki normal bağ uzunluğundan (tipik olarak 0,2 nm) daha kısa olduğunda gerçekleşir (Wang & Wang, 2019). Dolayısıyla iki yüzeyin teması, yüzeylerin nano ölçekte birbirine yaklaştığını ifade eder. Zhang ve arkadaşları (Zhang et al., 2018) dielektrik malzeme kalınlığının etkisini araştıran çalışmalarında da benzer bir bulgu bulmuşlardır. Burada baskın faktörün triboelektrik malzeme kalınlığına bağlı olarak deformasyon sonucu temas yüzey alanının değişmesi olduğunu belirtmekte fayda var. Ancak dielektrik malzeme kalınlığının gerilim ve akım üzerindeki ters etkisi (Denklem (4.4) ve (4.7)) 0,85 mm'den yüksek kalınlıklar için daha baskındır. Ek olarak, malzeme kalınlığındaki daha fazla artış, malzemenin sertliğini arttırmış ve arayüzey bölgesindeki deformasyonu azaltmış olabilir.

Tribo-negatif malzeme olarak ağırlıkça %2,5 Al veya %2,5 Ti iletken parçacık katkılı silikon kullanılarak kalınlık optimizasyonu yapıldıktan sonra hem Al hem de Ti katkılı silikon için optimum kalınlık 0,85 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.5'te silikona ağırlıkça farklı oranlarda Al veya Ti iletken parçacıklarının katkılanmasının TENG'in elektriksel çıktıları verilmiştir.

Şekil 4.5 (a)'da cam fiber ve Al katkılı silikondan üretilen TENG'lerin anlık voltajları gösterilmektedir. Ağırlıkça %2,5 oranına kadar Al katkılı silikonun anlık voltaj artmıştır. Ancak ağırlık oranının daha fazla artmasıyla anlık voltajda düşüş gözlemlenmektedir. Ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5 ve %10 oranlarında Al iletken parçacığı katkılı silikon kullanılarak üretilen TENG'lerin anlık voltajları sırasıyla 330 V, 442 V, 500 V, 487 V ve 397 V olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %2,5 oranında Al katkılı silikon kullanılarak üretilen TENG'in anlık voltajı, saf silikonla üretilen TENG'in anlık voltajına kıyasla %51,5 daha iyi performans sergilemiştir. Şekil 4.5 (b)'de Ti katkılanmış silikonlar kullanılarak üretilen TENG'lerin anlık voltaj eğrileri verilmiştir. Eğrilere bakıldığında katkı oranının en iyi performansı ağırlıkça %5 oranında sergilediği görülmektedir. Ti katkılı TENG'lerin anlık

voltajları Tablo 4.2’de verilmiştir. Ağırlıkça %5 oranında Ti katkısı çıkış voltajını saf silikona kıyasla %48,5 oranında arttırmıştır.



Şekil 4.5. Ağırlıkça farklı oranlarda Ti veya Al katkılı silikonlar için (a-b) anlık voltaj eğrileri, (c-d) kapasitör şarj-deşarj eğrilerini, (e-f) sürekli frekansta şarj eğrileri

Depolanan yük miktarını belirlemek için TENG’e köprü diyot üzerinden 0,022 μF 'lık bir kapasitör bağlanmıştır. Şekil 4.5(c)’de Al katkılı TENG’ler için bir darbeye karşılık gelen kapasitör şarj-deşarj eğrileri göstermektedir. Maksimum kapasitör gerilimleri, ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5 ve %10 oranında Al katkılı silikondan üretilen TENG’ler için sırasıyla 6,58 V, 8,49 V, 10,4 V, 9,32 V ve 8,06 V (Tablo 4.2’de) olarak ölçülmüştür. $Q = C \cdot V$

formülü kullanılarak, ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5 ve %10 Al katkılı silikondan üretilen TENG'lerin depolanan yük miktarlarının sırasıyla 145 nC, 187 nC, 228 nC, 205 nC ve 177 nC olarak bulunmuştur. Şekil 4.5 (d)'de Ti katkılı TENG'lerin 0,022 μ F'lık bir kapasitif yük altında maksimum tepe kapasitör gerilimleri verilmiştir. Ti katkısında kapasitör gerilimleri %5 katkı oranına kadar artmış daha sonra düşmüştür. Tepe kapasitör gerilimleri ve depolanan yükler, anlık voltajlar ile uyumlu olduğu görülmektedir (Tablo 4.2'de).

TENG'lerin enerji dönüşüm performansını ölçmek için, bir yorulma makinesi yardımıyla 20 N'luk bir kuvvet 3 Hz frekans aralığında çalıştırılmıştır. Şekil 4.5 (e)'de 0,5 μ F'lık bir kapasitör altında çalıştırılan Al katkılı TENG'lerin şarj eğrilerini göstermektedir. Elde edilen grafik en iyi çıkış voltajını sergileyen ağırlıkça %2,5 Al katkılı silikondan üretilen TENG'in kapasitörü diğer TENG'lere göre daha yüksek bir voltaja kadar beslediğini göstermiştir. Şekil 4.5 (f)'de 20 N'luk bir kuvvet altında ve 3 Hz frekansında 0,5 μ F'lık kapasitif yükün Ti katkılı silikondan üretilen TENG'lerin şarj eğrileri verilmiştir. Bu eğrilere göre ağırlıkça %5 Ti katkılı silikondan üretilen TENG'in en iyi elektriksel çıkış performansı sergilediği görülmektedir.

Şekil 4.5'de verilen sonuçlara göre Al katkısında ağırlıkça %2,5 oranında en iyi elektriksel çıktıyı verirken Ti katkısı ağırlıkça %5 oranında en iyi elektriksel çıktıyı vermektedir. Silikona ağırlıkça farklı oranlarda Al veya Ti parçacıklarının katkılanması TENG'in elektriksel çıkış performansını belirli bir orana kadar arttırmaktır. Triboelektrik katmana iletken parçacıklarının eklenmesi, dielektrik özelliği arttırmak ve triboelektrik yük dağılımını optimize etmek için uygun bir yöntemdir. Dielektrik malzemeye belirli bir orana kadar katkılanan iletkenler, daha yüksek dielektrik sabiti ile kompozit malzeme oluşturulmasına yardımcı olur. Ancak eklenen iletken miktarı belirli bir oranı aştığında dielektrik sabiti hızla azalır (Zhang and Cheng, 2011). Triboelektrik malzemelerin dielektrik sabitindeki (ϵ_{r1} veya ϵ_{r2}) artış, Denklem (4.1) ve (4.7)'de belirtildiği gibi voltaj ve akımda artışa neden olur. Diğer bir neden ise Al veya Ti katkı maddelerinin triboelektrik malzemenin yüzey pürüzlülüğünü artırarak daha fazla potansiyel temas yüzeyi anlamına gelmesidir. Daha fazla temas yüzeyi, yük değişimini ve dolayısıyla elektrik çıkışını değiştiren en baskın parametre olan yüzey yük yoğunluğunu yoğunlaştırır. Şekil 4.3'te Al veya Ti katkılarına sahip silikon malzemelerin yüzey morfolojilerini ve 3 boyutlu topografik haritasını göstermektedir. Al veya Ti katkıları yüzey pürüzlülüğünü ve

dolayısıyla etkin temas yüzey alanını arttırır. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünün belirli bir değere kadar artması akım, gerilim ve güç çıkışlarında artışa neden olur. Bir TENG'in performansını belirleyen baskın parametre temas elektrifikasyonudur. Temas elektrifikasyon miktarının yoğunlaştırılması, TENG elektrik çıkışlarını artırır.

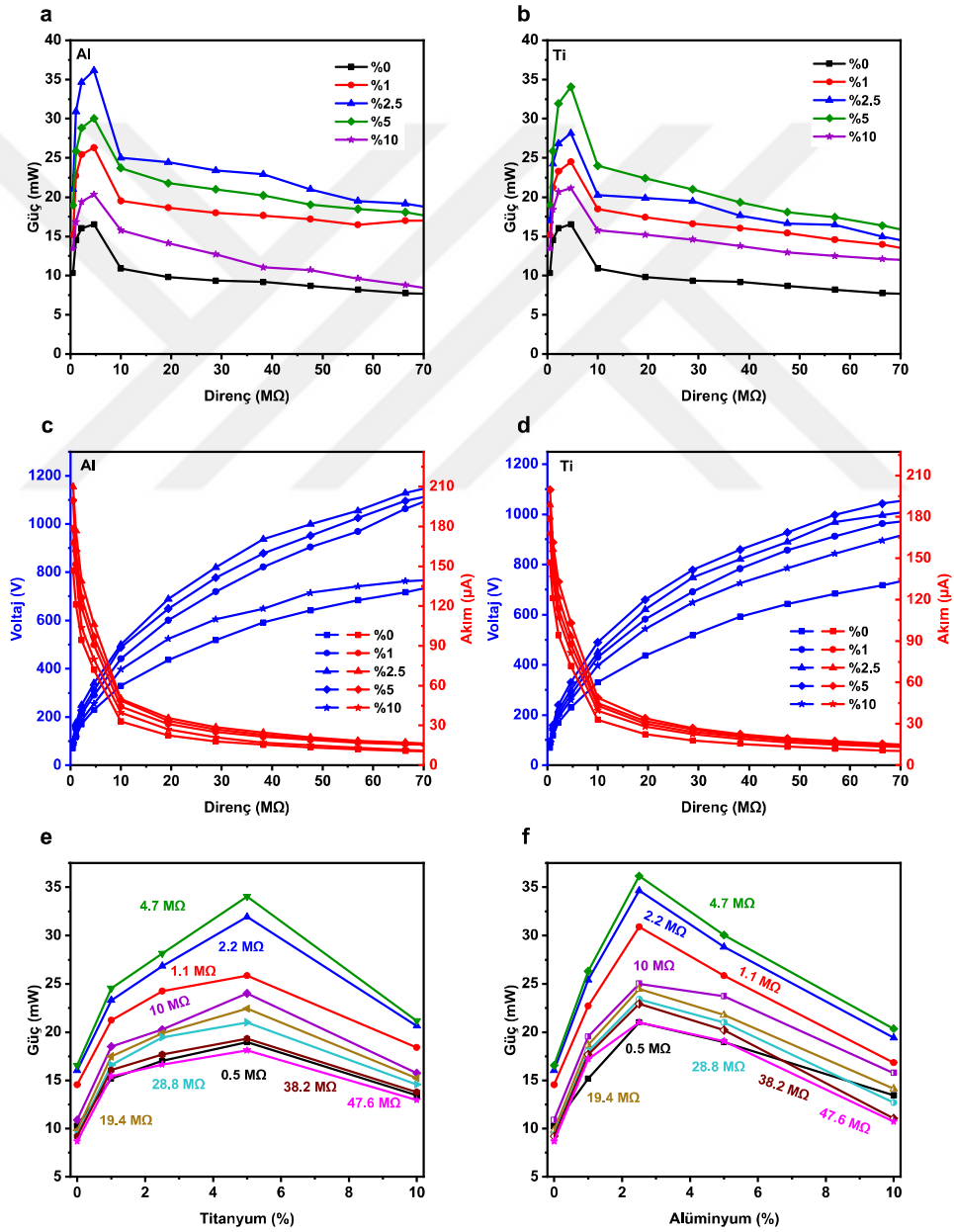
Temas elektrifikasyonu, farklı elektron ilgilerine sahip malzemelerin temas etmesi ile meydana gelir. Her malzemenin temas elektrifikasyonunun belirli sınırları vardır. Triboelektrik serisi kullanılarak seçilen malzeme çiftlerinin serideki konumları yüzey yük yoğunluğunu etkiler. Yüzey yük yoğunluğu arttırmak için seride birbirlerinden uzak malzemeler seçilir. Ancak ne tür malzeme kullanılırsa kullanılsın, yüzey yük yoğunluğu belirli bir seviyeye ulaştığında, çeşitli nedenlerle malzemeler arasındaki yük alışverişi durur. Dielektrik malzemeler yalıtkandır ve yüklerin ihmal edilebilir kayıplar ile uzun süre yüzeyde depolanmasına izin verirler. Sonuç olarak, yüzey yük yoğunluğu uzun süre sabit kalabilir ve TENG, elektrostatik indüksiyon yoluyla elektrotlarda yük akışı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu yalıtım özelliği, yüzey yük yoğunluğunun çok ince bir triboelektrik malzeme bölgesinde doygunluğa ulaşmasına neden olur. Dielektrik malzemeye katkılı iletken parçacıklar ise yüzeydeki yüklerin dielektrik malzemenin iç bölgelerine taşınmasını sağlar (Lai et al., 2018). Yüzey ile iç bölgeler arasında iletken kanallar oluşturan gömülü iletken katkı maddeleri sayesinde triboelektrik malzemenin iç kısmında da net yüklü bölgelerin oluşması sağlanır (Cui et al., 2016). İç bölgelerde oluşan bu yükler elektrostatik indüksiyona katkıda bulunarak TENG performansını güçlendirir. Bu iletken kanallar kullanılarak yükler iç kısımlara aktarılacak temas yüzeylerindeki yük yoğunluğunun doygunluğu bir miktar geciktirilir. Böylece triboelektrik malzemeler arasındaki yük alışverişi devam eder. Ayrıca iç bölgelere taşınan yüklerin özellikle havadaki iyonlarla etkileşimi engellenir. Bu nedenle triboelektrik malzemenin yük depolama veya yakalama kapasitesi artırılmış olur. Al veya Ti katkıları ile akım ve voltajda artış elde edilmesi bunun kanıtı ve bir sonucu olarak kabul edilebilir.

Ancak burada cevaplanması gereken bir diğer soru da Al veya Ti katkı miktarları belirli bir seviyeyi aştığında gerilim ve akım değerleri neden düşüyor? Bu sorunun çeşitli cevapları var. Öncelikle herhangi bir kompozit malzemenin dielektrik sabiti bir iletkenin gömülmesi nedeniyle belirli bir değere kadar yükselir ancak iletken katkılanması kritik noktaya ulaştığında kompozit malzemenin dielektrik sabiti aniden düşer. Bu kritik katkılama

miktarına sızma eşiği denir. Sızma eşiğini aşan iletken katkılama, kompozit dielektrik malzemede iletken kanalların oluşmasına neden olur ve bu durumda kompozit dielektrik malzeme, iletken bir malzeme davranışı sergilemeye başlar (Zhang and Cheng, 2011). Denklem (4.1) ve (4.7)'de belirtildiği gibi malzemenin dielektrik sabitindeki azalma gerilim ve akımda zayıflamaya neden olur. Ayrıca kompozit malzeme içerisinde iletken kanalların sürekli oluşumu tribo malzeme içerisinde yüklerin depolanmasını engellemekte ve elektrotlar ile tribo malzeme arasında bir yük alışverişine yol açarak elektrotlar arasında indüklenen elektrik potansiyel farkının aniden düşmesine neden olmaktadır. Ancak yapılan çalışmada malzemelerin dielektrik sabitinin ve iletkenliğinin ölçülmediğini belirtmekte fayda var. Silikon malzemedeki Al veya Ti oranı belirli bir değeri aştıktan sonra elektrik çıkışlarının azalmasının bir başka nedeni de ara yüzeyde silikon yüzey alanının toplam temas yüzey alanına oranındaki azalmadır. Silikon malzemeye Al veya Ti katkılama oranındaki artış, silikonun hacim oranının azalmasına yol açar, bu nedenle ara yüzeyi oluşturan silikon yüzey alanı azalır. Optik mikroskop görüntülerinden de anlaşılabileceği gibi Şekil 4.2'de artan katkı oranı ile yüzeyde daha fazla Al veya Ti birikmeye başlar. Başka bir deyişle, tribo-elektrifikasyon sırasında daha az silikon yüzey ve daha fazla Al veya Ti yüzeyi tribo-pozitif malzeme olan cam fiber ile temas eder. Silikon, triboelektrik seri tablosunda Al ve Ti'den daha yüksek tribo-negatif özelliklere sahiptir. Buna göre, tribo-elektriklenme esnasında daha az silikon temas alanının bulunması, yük alışverişinde bozulmaya neden olur. Diğer bir sebep ise yüzey pürüzlülüğü etkisidir. Daha önce de belirtildiği gibi, yüzey pürüzlülüğü ile etkin yüzey alanı artar. Bu pürüzlülük nano-mikro boyutları aştığı için temas alanını azaltır. Nano/mikro boyutlardaki pürüzlülük malzemelerin yüzeylerindeki girinti ve çıkıntıları arttırırken daha büyük ölçekli pürüzlülükler temas alanı azaltır. Ayrıca yeterli kuvvet uygulandığında, yeterince esnek bir malzeme için girinti ve çıkıntıların tam olarak iç içe geçmesi sağlanarak etkin temas yüzeyi artırılır. Bu koşullar karşılanmazsa, uygun olmayan temas nedeniyle pürüzlülük miktarı da TENG elektrik çıkış performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir.

Çıkış voltajı sinyali, özellikle sensör olarak kullanıldığında TENG'ler için önemli bir parametredir. Belirli bir büyüklük ve frekanstaki bir kuvvet altında çıkış voltajları ne kadar yüksek olursa, herhangi bir mekanik etkiyi algılama yetenekleri o kadar büyük olur. Sonuç olarak, farklı yük dirençlerinde çıkış gerilimlerinin belirlenmesi önemlidir. Ayrıca TENG'ler elektriksel güç kaynağı olarak da kullanılmaktadır. Bu nedenle ürettikleri

gerilim değeri kadar elektriksel güç değeri de önemlidir. Farklı kapasite ve özelliklere sahip cihazların güç ihtiyaçları bir TENG ile sağlanacak ise elektrik akımı farklı yük dirençlerine maruz kalacaktır. Bu durumu örnek oluşturması için, bu çalışma kapsamında üretilen TENG'ler, değişken yük direncine sahip dirençlere bağlanır ve voltaj, akım ve elektriksel güç büyüklükleri elde edilir. Şekil 4.6'da farklı ağırlık oranlarına sahip Al veya Ti katkı silikondan üretilen TENG'ler için farklı yükler altında güç, akım ve voltaj eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.6. Ağırlıkça farklı oranlarda Ti veya Al katkı silikonlar için (a-b) maksimum güç eğrileri, (c-d) akım-voltaj eğrileri ve (e-f) katkılama oranına bağlı olarak güç değişim eğrileri

Şekil 4.6 (a)'da farklı ağırlık oranlarına sahip Al katkılı silikonlardan yapılmış TENG'ler için değişken yük direnci altındaki güç değişim eğrileri verilmiştir. Al katkılı silikonlardan üretilen TENG'lerin maksimum çıkış güçleri $4,7 \text{ M}\Omega$ 'luk yük direnci altında elde edilmiştir. Ağırlıkça %0, %1, %2,5, %5 ve %10 Al katkılı silikonlar için sırasıyla maksimum çıkış güçleri 16,5 mW, 26,3 mW, 36,2 mW, 30,1 mW ve 20,3 mW olarak belirlenmiştir. Çıkış gücü açısından en iyi performansı veren ağırlıkça %2,5 oranında Al katkılı silikonun gücü 36,2 mW olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Öte yandan, $4,7 \text{ M}\Omega$ 'da 34,1 mW'lık maksimum tepe çıkış gücü, ağırlıkça %5 Ti Silikon/Camfiber'den üretilen TENG tarafından sağlanır (Şekil 4.6 (b) ve Tablo 2).

Al katkılı silikonlar için değişken yük direnci altındaki akım ve gerilim eğrileri Şekil 4.6 (c)'de verilmiştir. Yük direncindeki artış, omik kayıp nedeniyle akımı sınırladığından, akım sürekli olarak azalır, ancak voltaj yükselmeye devam eder. Al katkılı silikondan üretilen TENG için 1129 V civarı doygunluk bölgesidir. Ti katkılı silikonlar için akım ve gerilim eğrileri Şekil 4.6 (d)'de verilmiştir. Şekil 4.6 (d)'de gösterildiği üzere en yüksek gerilim 1042 V ve en yüksek akım $199 \mu\text{A}$ olarak sırasıyla en yüksek ve en düşük yük dirençlerinde elde edilir.

Şekil 4.6 (e)'de Al gömme oranına bağlı olarak güç değişim eğrileri gösterilmektedir. Tüm yük dirençleri için, güç çıkışı ağırlıkça %2,5 katkılı Al'a kadar yükselir. Al katkı oranı arttıkça, Al partiküllerinin tribo-elektriklenme yüzeyinde kapladığı alan genişler ve bu da daha az silikonun cam fiber ile temas etmesine neden olur. Sonuç olarak, Al katkılanmasının belirli bir noktadan sonra daha da artması (ağırlıkça %2,5'ten fazla), TENG çıkış gücünün düşmesine neden olur. Öte yandan, $4,7 \text{ M}\Omega$ 'da 34,1 mW'lık maksimum tepe çıkış gücü, ağırlıkça %5 Ti Silikon/Camfiber'den üretilen TENG tarafından sağlanır (Şekil 4.6 (d-f) ve Tablo 2).

Sonuçlar Al veya Ti katkı maddelerinin silikonun tribo-elektrifikasyon potansiyelini arttırdığını ve en iyi sonuçların ağırlıkça %2,5 Al ve ağırlıkça %5 Ti iletken parçacıklarının gömülmesinden elde edildiğini göstermektedir. Ağırlıkça %2,5 Al katkılı Silikon/Camfiber ve ağırlıkça %5 Ti katkılı Silikon/Camfiber TENG'lerin güç çıkışları, $4,7 \text{ M}\Omega$ yük direncinde maksimize edilir. Gerilim, akım ve güç değerleri Al katkısında ağırlıkça %2,5'e ve Ti katkısında ağırlıkça %5'e kadar yükselir ve ardından düşer. Al ve Ti katkı

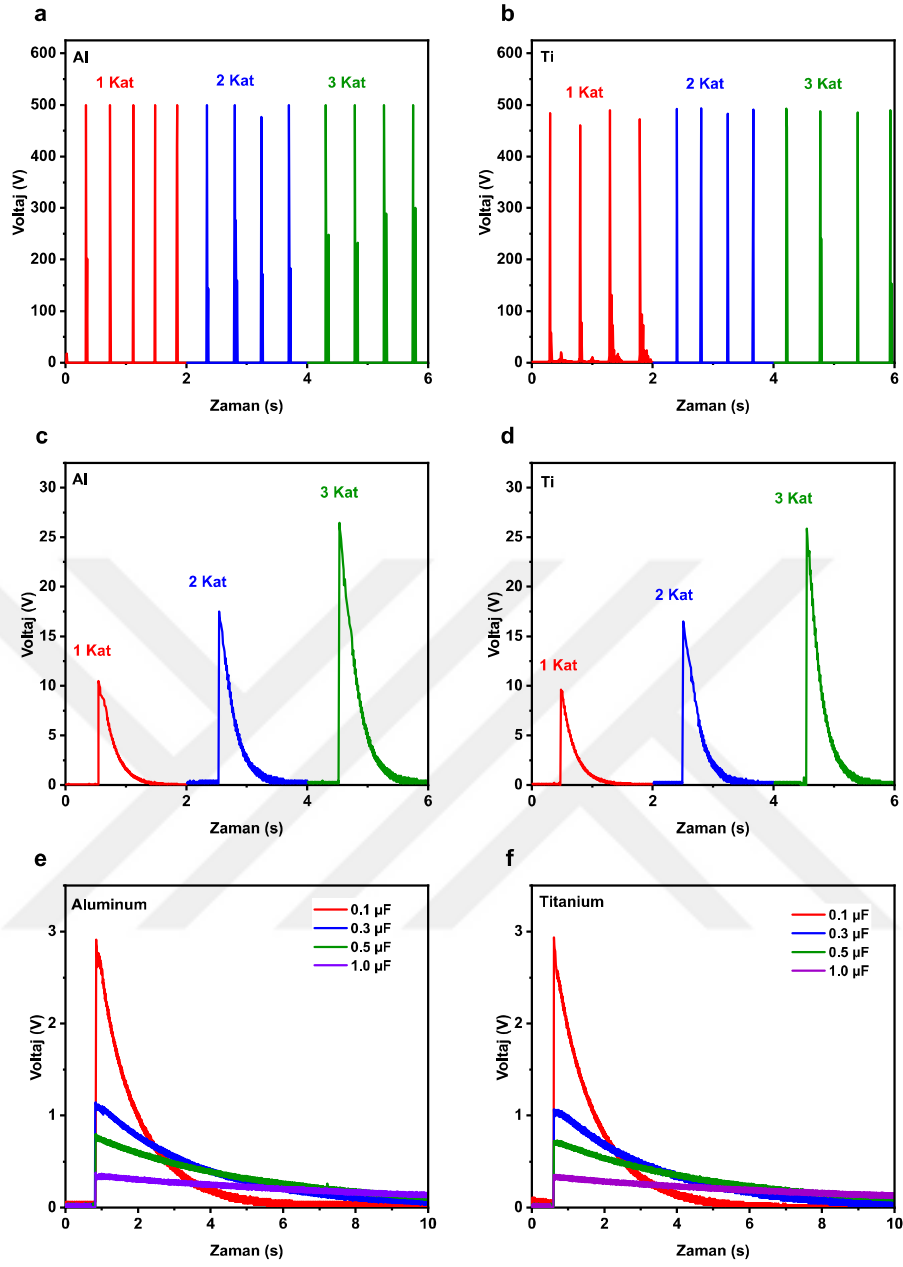
maddelerinin TENG'in elektriksel çıktıları üzerindeki etkisi, temel olarak dielektrik sabitinin ve yüzey pürüzlülüğünün ayarlanmasına ve yüklerin temas yüzeyinin alt bölgelerine aktarılmasına ve burada tutulmasına veya depolanmasına bağlanabilir.

Tablo 4.2. Ağırlıkça farklı oranlarda Al ve Ti katkılı silikondan yapılan TENG'ler için elektriksel değerler

	Ağırlık %	0	1	2,5	5	10
Al katkılı silikon	Çıkış gerilimi (V)	330	442	500	487	397
	Kapasitör gerilimi (V)	6,58	8,49	10,4	9,32	8,06
	Maksimum güç (mW)	16,5	26,3	36,2	30,1	20,3
	Güç yoğunluğu (W/m ²)	10,3	16,4	22,6	18,8	12,7
	Yük (nC)	145	187	228	205	177
Ti katkılı silikon	Çıkış gerilimi (V)	330	430	450	490	401
	Kapasitör gerilimi (V)	6,58	8,29	8,90	9,50	8,13
	Maksimum güç (mW)	16,5	24,5	28,1	34,1	21,1
	Güç yoğunluğu (W/m ²)	10,3	15,3	17,6	21,3	13,2
	Yük (nC)	145	182	196	209	179

En iyi sonuçlar silikona ağırlıkça %2,5 Al ve ağırlıkça %5 Ti katkılanmasıyla elde edildi. Bu nedenle %2,5 Al veya %5 Ti katkılı silikonların farklı kapasitif yükler altında incelendi(Şekil 4.7 (e-f)).

TENG'lerin enerji üretim kapasitesini artırmanın en önemli yollarından biri çok katmanlı TENG tasarımları kullanmaktır. Belirli bir katman sayına kadar katman sayısında ki artış TENG'in çıkış performansını iyileştirir. Şekil 4.7'de TENG'in katman sayısındaki artışa bağlı olarak anlık voltaj ve şarj-deşarj eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.7. En iyi elektriksel çıktı veren Al veya Ti katkılı TENG'in (a-b) çok katlı anlık voltaj eğrileri, (c-d) şarj-deşarj eğrileri ve (e-f) farklı kapasitif yük altında şarj-deşarj eğrileri

Şekil 4.7 (a)'da ağırlıkça %2,5 Al katkılı silikondan yapılan çok katmanlı TENG'lerin çıkış voltajlarını gösterilmektedir. Çıkış voltajı katman sayısının değişmesine rağmen sabittir. Şekil 4.7 (b)'de ağırlıkça %5 Ti gömülü silikondan yapılan çok katmanlı TENG'lerin çıkış voltajlarını gösterilmektedir. TENG'ler paralel bağlandığından çıkış voltajları aynıdır.

Şekil 4.7 (c)'de ağırlıkça %2,5 Al gömülü silikondan yapılmış çok katmanlı TENG'lerin bir darbeye karşılık gelen kapasitör şarj-deşarj eğrilerini gösterir. 1, 2 ve 3 katmanlı TENG'lerin tek bir darbeye karşılık gelen kapasitör voltajları sırasıyla 10,4 V, 17,5 V ve 26,5 V olarak verilmiştir. Katman sayısı arttıkça kondansatör voltajının lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Kapasitör gerilimdeki artış, katman sayısı ile doğru orantılı olan çıkış akımının büyütülmesine bağlanır. Şekil 4.7 (d)'de ağırlıkça %5 Ti gömülü silikondan yapılmış çok katmanlı TENG'lerin kapasitör şarj-deşarj eğrileri verilmiştir. 1, 2 ve 3 katmanlı TENG'lerin tek bir darbeye karşılık gelen kapasitör voltajları sırasıyla 9,6 V, 16,5 V ve 25,9 V olduğu belirlenmiştir. Katman sayısı arttıkça kondansatör voltajının, katman sayısı ile paralel bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Gerilimdeki artış, katman sayısı ile doğru orantılı olan çıkış akımının büyütülmesine bağlanır. Ayrıca katman sayısındaki artış temas eden yüzey alanını ve buna bağlı olarak yüzey yük yoğunluğunu arttırmaktadır. Ancak bu durum belirli bir katman sayısına kadar böyledir. Belirli bir noktadan sonra katman sayısındaki artış uygulanan kuvvetin TENG'lere eşit şekilde dağılmasını önler ve esnekliğini azalmasına neden olur.

Şekil 4.7 (e)'de %2,5 Al katkılı silikondan yapılan TENG'in farklı kapasitanslar kullanılarak elde şarj-deşarj grafikleri verilmiştir. Kapasitans değeri arttıkça tepe gerilim değeri düşer vedeşarj süresi uzar. Şekil 4.7 (f)'de %5 Ti katkılı silikondan yapılan TENG'in farklı kapasitanslar kullanılarak elde şarj-deşarj grafikleri verilmiştir. Kullanılan kapasitansa göre tepe gerilim ve şarj/deşarj süresi değişmektedir.

Elde edilen sonuçlar, negatif bir triboelektrik malzeme olan silikona Al veya Ti iletken parçacıklarının eklenmesinin saf silikona oranla çıkış performansında önemli bir artış sağladığını göstermektedir. Al ve Ti gibi iletkenler belirli bir orana kadar kompozit malzemenin dielektrik sabitini artırır. Dielektrik sabitinin ayarlanması, TENG'in elektriksel çıkış performansını etkileyen önemli bir parametredir. Triboelektrik malzemeler arasında yük transferi, malzemelerin teması sonucu gerçekleşir. Malzemelere dokunmak tüm yüzey alanının tam temas halinde olmasını sağlamaz, başka bir deyişle etkin temas yüzey alanı geometrik yüzey alanından daha küçük olabilir. Uygulanan kuvvetin artırılması, fiziksel temasa giren yüzey alanını artırmak için önemli bir parametredir. Bu çalışmada temas sırasında uygulanan maksimum kuvvet 20 N'de sabit tutulmuştur. Ayrıca etkin temas alanında yüzey pürüzlülüğü önemli bir rol oynamaktadır. Silikona Al veya Ti

iletken parçacıkların eklenmesi yüzey pürüzlülüğünü artırır (Şekil 4.2 ve 4.3). Temas halindeki yüzeylerde meydana gelen yük transferi, malzemelerin elektron ilgilerinin farklılığı da bağlıdır. Yüzeyler arasındaki yük aktarımı doygunluk miktarına ulaştığında yük aktarımı durur. Al ve Ti gibi iletken malzemeler, triboelektrik temas yüzeyi ile malzemenin iç kısımları arasında iletken kanallar oluşturur. Böylece yüzeydeki yüklerin içeriye aktarılmasını sağlar. Tribo-elektrifikasyon sırasında yüklerin iç bölgelere aktarımı doyma noktasına ulaşmayı geciktirirken, havadaki iyonlarla etkileşerek yüklerin nötralizasyonunu azaltır (Firdous et al., 2021). Böylece, TENG'in elektriksel performansı artar.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, TENG'lerin çıkış gücünü arttırmak için farklı oranlarda Al veya Ti iletken parçacıkları tribo-negatif malzeme olan silikon içerisine katkılanmıştır. Ayrıca, maksimum güç çıkışı elde edebilmek için Al veya Ti katkılı silikon tabakasının kalınlığı optimize edilmiştir. Silikon içerisine %2.5 oranında Al veya Ti iletken parçacıkları eklenerek yapılan deneylerde her iki katkılı silikon için maksimum güç çıkışını veren optimum dielektrik kalınlığı 0,85 mm olarak belirlenmiştir. Silikon içerisine farklı oranlarda Al veya Ti iletkenler parçacıkları katkılanarak iletken parçacıklarının TENG performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve en iyi sonucu veren katkı miktarları belirlenmiştir. Hem Al hem de Ti için TENG güç çıkışları belirli değerlere kadar yükselmiş daha sonra düşmüştür. Silikon içerisine Al veya Ti katkılanması, kompozit malzemenin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde arttırmıştır. TENG'in elektrik çıktılarındaki artış, artan yüzey pürüzlülüğüne, dielektrik sabitine ve yüzey yük yoğunluğundaki artışa bağlanabilir. Daha fazla iletken eklenmesi sonucu sızma eşiğinin aşılması, yüzey pürüzlülüğünde düzensiz artış, temas yüzeyinde iyi bir dielektrik malzeme olan silikonun alansal olarak azalmasına ve elektrotlar ile dielektrik malzeme arasında yük alışverişine neden olan iletken kanalların oluşumundaki artış TENG'in çıkış performansın düşmesinin olası nedenleridir.

En iyi elektrik çıktıları ağırlıkça %2,5 Al ve ağırlıkça %5 Ti katkılı silikon ve cam fiberden üretilen TENG'lerden elde edilmiştir. Saf silikondan üretilen TENG'in sırayla anlık tepe çıkış voltajı, akımı ve maksimum gücü 717 V ($R_{es} = 66,4 \text{ M}\Omega$), 147 μA ($R_{es} = 0,5 \text{ M}\Omega$) ve 16,5 mW'dir ($R_{es} = 4,7 \text{ M}\Omega$) olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %2,5 Al katkılı silikondan üretilen TENG'in sırayla anlık tepe çıkış voltajı, akımı ve maksimum gücü 1129 V ($R_{es} = 66,4 \text{ M}\Omega$), 210 μA ($R_{es} = 0,5 \text{ M}\Omega$) ve 36,2 mW'dir ($R_{es} = 4,7 \text{ M}\Omega$) olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %5 Ti katkılı silikondan üretilen TENG'in sırasıyla anlık tepe çıkış voltajı, akımı ve maksimum gücü 1042 V ($R_{es} = 66,4 \text{ M}\Omega$), 199 μA ($R_{es} = 0,5 \text{ M}\Omega$), 34,1 mW ($R_{es} = 4,7 \text{ M}\Omega$) olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %2,5 Al veya ağırlıkça %5 Ti katkılı silikon ve cam fiberden üretilen TENG'lerin sırasıyla maksimum güç yoğunluğu 22,6 W/m² ve 21,3 W/m² olarak hesaplanmıştır. Ağırlıkça %2,5 Al ve ağırlıkça %5 Ti katkılama oranları, saf silikona

kıyasla sırasıyla 2,19 kat ve 2,06 kat çıkış güç yoğunluğunu arttırmıştır. Ek olarak, 66,4 M Ω yük direnci altında ağırlıkça %2,5 Al ve ağırlıkça %5 Ti katkılı silikondan üretilen TENG'lerin çıkış voltajları saf silikondan üretilen TENG'e kıyasla sırasıyla %57,4 ve %45,4 daha fazladır. Bu iki katkı malzemesi kıyaslanınca Al katkısının Ti katkısına göre daha yüksek elektriksel çıkışlar sağladığı tespit edilmiştir.

Hem kalınlık hem de katkı oranları optimize edilmiş Al veya Ti katkılı silikondan üretilen TENG'ler için daha sonra 1, 2 ve 3 katman olacak şekilde çıkış performansları incelenmiştir. Katman sayısındaki artış akımın, temas yüzey alanının ve yüzey yük yoğunluğunun artmasına neden olurken voltaj sabit kalmıştır. TENG'lerin çok katlı olarak üretilmesi, TENG'lerin güç ve şarj kapasitesini önemli ölçüde artıran kullanışlı bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

Babu, A., Rakesh, D., Supraja, P., Mishra, S., Kumar, K. U., Kumar, R. R., ... and Nagapuri, R. (2022). Plant-based triboelectric nanogenerator for biomechanical energy harvesting. *Results in Surfaces and Interfaces*, 8(8), 100075.

Bai, P., Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Chen, J., Zhang, G., ... and Wang, Z. L. (2013). Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions. *ACS Nano*, 7(4), 3713–3719.

Bekir Ege, M., Font, A., Bolat, S., and Kalenderli, O. (2014). Design principles and performance analysis of a wimshurst generator. *ICHVE 2014 - 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application*.

Chen, X., Gao, L., Chen, J., Qi, M., Li, D., Zeng, S., and Mu, X. (2019). Study on the Influence of Ferroelectric Materials on the Output Performance of Triboelectric Nanogenerators. *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems and Eurosensors XXXIII, TRANSDUCERS 2019 and EUROSENSORS XXXIII*, 6, 342–345.

Chun, J., Ye, B. U., Lee, J. W., Choi, D., Kang, C. Y., Kim, S. W., Wang, Z. L., & Baik, J. M. (2016). Boosted output performance of triboelectric nanogenerator via electric double layer effect. *Nature Communications*, 7(5), 1–9.

Cui, N., Gu, L., Lei, Y., Liu, J., Qin, Y., Ma, X., ... and Wang, Z. L. (2016). Dynamic Behavior of the Triboelectric Charges and Structural Optimization of the Friction Layer for a Triboelectric Nanogenerator. *ACS Nano*, 10(6), 6131–6138.

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

Firdous, I., Fahim, M., and Daoud, W. A. (2021). Performance enhancement of triboelectric nanogenerator through hole and electron blocking layers-based interfacial design. *Nano Energy*, 82, 105694.

Han, M., Chen, X., Yu, B., and Zhang, H. (2015). Coupling of Piezoelectric and Triboelectric Effects: from Theoretical Analysis to Experimental Verification. *Advanced Electronic Materials*, 1(10), 1500187.

Kinas, Z., Karabiber, A., Yar, A., Ozen, A., Ozel, F., Ersöz, M., and Okbaz, A. (2022). High-performance triboelectric nanogenerator based on carbon nanomaterials functionalized polyacrylonitrile nanofibers. *Energy*, 239.

Lai, M., Du, B., Guo, H., Xi, Y., Yang, H., Hu, C., ... and Wang, Z. L. (2018). Enhancing the Output Charge Density of TENG via Building Longitudinal Paths of Electrostatic Charges in the Contacting Layers. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10(2), 2158–2165.

Li, X., Xu, G., Xia, X., Fu, J., Huang, L., and Zi, Y. (2019). Standardization of triboelectric nanogenerators: Progress and perspectives. *Nano Energy*, 56(November 2018), 40–55.

Liberman, E. J. (2015). Experimental Testing Of a Van De Graaff Generator As An Electromagnetic Pulse Generator. 3.

Liu, D., Zhou, L., Wang, Z. L., and Wang, J. (2021). Triboelectric nanogenerator: from alternating current to direct current. *IScience*, 24(1), 102018.

Liu, W., Wang, Z., and Hu, C. (2021). Advanced designs for output improvement of triboelectric nanogenerator system. *Materials Today*, 45(5), 93–119.

Lungu, M. (2004). Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect. *Minerals Engineering*, 17(1), 69–75.

Luo, J., and Wang, Z. L. (2020). Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications. *EcoMat*, 2(4), 1–22.

Lv, S., Zhang, X., Huang, T., Yu, H., and Zhu, M. (2021). Interconnected array design for enhancing the performance of an enclosed flexible triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 89(PB), 106476.

Ma, M., Kang, Z., Liao, Q., Zhang, Q., Gao, F., Zhao, X., ... and Zhang, Y. (2018). Development, applications, and future directions of triboelectric nanogenerators. *Nano Research*, 11(6), 2951–2969.

Niu, S., Wang, S., Lin, L., Liu, Y., Zhou, Y. S., Hu, Y., and Wang, Z. L. (2013). Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy and Environmental Science*, 6(12), 3576–3583.

Niu, S., and Wang, Z. L. (2014). Theoretical systems of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 14, 161–192.

Nurmakanov, Y., Kalimuldina, G., Nauryzbayev, G., Adair, D., and Bakenov, Z. (2021). Structural and Chemical Modifications Towards High-Performance of Triboelectric Nanogenerators. *Nanoscale Research Letters*, 16(1).

Okbaz, A., Karabiber, A., Yar, A., Kinas, Z., Sarilmaz, A., and Ozel, F. (2022). High-performance triboelectric nanogenerator with optimized Al or Ti-embedded silicone tribomaterial. *Energy Conversion and Management*, 252(December 2021), 115053.

Ozen, A., Karabiber, A., Kinas, Z., and Ozel, F. (2022). High-Power Triboelectric Nanogenerator Based on Enriched Polyvinylpyrrolidone Nanofibers for Energy Harvesting. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 219(8), 1–9.

Ozen, A., Ozel, F., Kinas, Z., Karabiber, A., and Polat, S. (2021). Spring assisted triboelectric nanogenerator based on sepiolite doped polyacrylonitrile nanofibers. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(6), 101492.

Wang, J., Zhou, L., Zhang, C., and Lin Wang, Z. (2020). Small-Scale Energy Harvesting from Environment by Triboelectric Nanogenerators. *A Guide to Small-Scale Energy Harvesting Techniques*. 83703.

Wang, S., Lin, L., and Wang, Z. L. (2015). Triboelectric nanogenerators as self-powered active sensors. *Nano Energy*, 11, 436–462.

Wang, Y., Yang, Y., and Wang, Z. L. (2017). Triboelectric nanogenerators as flexible power sources. *Npj Flexible Electronics*, 1(1), 1–9.

Wang, Z. L. (2013). Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS Nano*, 7(11), 9533–9557.

Wang, Z. L. (2014). Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - Principles, problems and perspectives. *Faraday Discussions*, 176, 447–458.

Wang, Z. L. (2017). On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators. *Materials Today*, 20(2), 74–82.

Wang, Z. L. (2020a). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy*, 68(October 2019), 104272.

Wang, Z. L. (2020b). Triboelectric Nanogenerator (TENG)—Sparkling an Energy and Sensor Revolution. In *Advanced Energy Materials* (Vol. 10, Issue 17).

Wang, Z. L., Jiang, T., and Xu, L. (2017). Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *Nano Energy*, 39(5), 9–23.

Wang, Z. L., and Wang, A. C. (2019). On the origin of contact-electrification. *Materials Today*, 30(11), 34–51.

Wang, Z. L., Zhu, G., Yang, Y., Wang, S., and Pan, C. (2012). Progress in nanogenerators for portable electronics. *Materials Today*, 15(12), 532–543.

Wu, C., Wang, A. C., Ding, W., Guo, H., and Wang, Z. L. (2019). Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials*, 9(1), 1–25.

Yar, A., Kınas, Z., Karabiber, A., Ozen, A., Okbaz, A., and Ozel, F. (2021). Enhanced performance of triboelectric nanogenerator based on polyamide-silver antimony sulfide nanofibers for energy harvesting. *Renewable Energy*, 179, 1781–1792.

Yiğit Arkan, M. Z., Kınas, Z., Arkan, E., Gökçe, C. O., Kara, K., Karabiber, A., ... and Özel, F. (2022). Molecular engineering-device efficiency relation: Performance boosting of triboelectric nanogenerator through doping of small molecules. *International Journal of Energy Research*, August, 1–13.

Yin, X., Liu, D., Zhou, L., Li, X., Zhang, C., Cheng, P., ... and Wang, Z. L. (2019). Structure and Dimension Effects on the Performance of Layered. *ACS Nano*, 13(1), 698–705.

Yu, A., Jiang, P., and Lin Wang, Z. (2012). Nanogenerator as self-powered vibration sensor. *Nano Energy*, 1(3), 418–423.

Zhang, L., and Cheng, Z. Y. (2011). Development of Polymer-Based 0–3 Composites With High Dielectric Constant. *Journal of Advanced Dielectrics*, 01(04), 389–406.

Zhang, L. M., Han, C. B., Jiang, T., Zhou, T., Li, X. H., Zhang, C., and Wang, Z. L. (2016). Multilayer wavy-structured robust triboelectric nanogenerator for harvesting water wave energy. *Nano Energy*, 22, 87–94.

Zhang, R., and Olin, H. (2020). Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review. *EcoMat*, 2(4), 1–13.

Zhang, Z., Sun, X., Chen, Y., Debeli, D. K., and Guo, J. (2018). Comprehensive dependence of triboelectric nanogenerator on dielectric thickness and external impact for high electric outputs. *Journal of Applied Physics*, 124(4).

Zhu, G., Peng, B., Chen, J., Jing, Q., and Lin Wang, Z. (2014). Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications. *Nano Energy*, 14, 126–138.

Zi, Y., and Wang, Z. L. (2017). Nanogenerators: An emerging technology towards nanoenergy. *APL Materials*, 5(7).

Zou, H., Zhang, Y., Guo, L., Wang, P., He, X., Dai, G., ... and Wang, Z. L. (2019). Quantifying the triboelectric series. *Nature Communications*, 10(1), 1–9.

Zou, Y., Libanori, A., Xu, J., Nashalian, A., & Chen, J. (2020). Triboelectric Nanogenerator Enabled Smart Shoes for Wearable Electricity Generation. *Research*, 2020, 1–2

