

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TRIBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLERDE ENERJİ
YOĞUNLUĞUNU ARTIRMAK İÇİN DİELEKTRİK BOYUT
OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER DİRİK

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER

BİNGÖL-2024

**TRİBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLERDE ENERJİ YOĞUNLUĞUNU
ARTIRMAK İÇİN DİELEKTRİK BOYUT OPTİMİZASYONU**

Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER danışmanlığında, Ömer DİRİK tarafından hazırlanan bu çalışma 21/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Abdulkerim OKBAZ *İmza* :
Üye : Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER *İmza* :
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK *İmza* :

Yukarıdaki sonuç;

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

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

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

Bu tez çalışmasının her aşamasında değerli katkıları ve rehberliği ile bana yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER’e,

Deneysel çalışmalar sırasında bilgi birikimi ile her türlü teknik desteği sağlayan Arş. Gör. Feyyaz Koç’a,

Son olarak eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, başta babam olmak üzere tüm aileme,

Teşekkürü borç bilir, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ömer DİRİK
Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. TRİBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLER	4
2.1. Triboelektrik ve Tarihçesi	5
2.2. Triboelektrik Seri	7
2.3. TENG'lerin Temel Teorisi	9
2.4. TENG'lerin Çalışma Prensibi	11
2.5. TENG'lerin Çalışma Modları	13
2.5.1. Dikey Temas-Ayırma Modu	14
2.5.2. Yanal Kayma Modu	14
2.5.3. Tek Elektrotlu Mod	15
2.5.4. Bağımsız Triboelektrik-Katman Modu	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1. TENG İmalatı	16
3.1.1. Dielektrik Malzeme Seçimi ve İmalatı	16
3.1.2. Destek Katmanlarının Hazırlanması	19
3.1.3. Dielektrik Boyut Optimizasyonu	20
3.1.3.1. Kalınlık Optimizasyonu	20
3.1.3.2. Yüzey Alanı Optimizasyonu	21

3.1.4. Çok Hücreli TENG İmalatı	21
3.1.4.1. Dikey-Çok Hücreli TENG İmalatı	22
3.1.4.2. Yatay-Çok Hücreli TENG İmalatı	23
3.2. Ölçüm ve Karakterizasyon	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Kalınlık Optimizasyonu.....	27
4.2. Yüzey Alanı Optimizasyonu	30
4.3. Çok Hücreli TENG'ler	39
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Dielektrik alanı
B	: Manyetik alan
C	: Etkin kapasitans
C_0	: Vakum kapasitansı
C_L	: Kapasitif yükün kapasitans değeri
C_m	: Ölçülen kapasitans
d	: Dielektrik kalınlığı
D	: Yer değiştirme alanı
E	: Elektrik alan
E_S	: Kapasitörde depolanan enerji
f	: Çalışma frekansı
G_m	: Ölçülen iletkenlik
H	: Manyetik alan şiddeti
I_C	: Yük akımı
I_R	: Dielektrik kaçak akımı
I_{TENG}	: Triboelektrik nanogeneratör tarafından üretilen akım
J	: Serbest elektrik akım yoğunluğu
J_D	: Yer değiştirme akımı
LED	: Işık yayan diyot
P	: Polarizasyon alanı
P_L	: Dielektrik kayıplar
P_{TENG}	: Triboelektrik nanogeneratör gücü
PENG	: Piezoelektrik nanogeneratör
PLC	: Programlanabilir mantıksal kontrolör
PMMA	: Polimetil metakrilat
PyENG	: Piroelektrik nanogeneratör
Q_{SC}	: Kapasitif yükte toplam transfer yükü
R_0	: Dielektrikler arasındaki elektrik direnci

R_{DC}	: Eşdeğer DC direnç
R_{eq}	: Eşdeğer direnç
R_L	: Devreye bağlı yük direnci
TENG	: Triboelektrik nanogeneratör
V_i	: Uygulanan gerilim
V_{OUT}	: Çıkış gerilimi
V_{OC}	: Açık devre voltajı
V_{CL}	: Kapasitif yük altında çıkış gerilimi
V_m	: Ölçülen gerilim
V_{RL}	: Omik yük altında çıkış gerilimi
x	: İki dielektrik arasındaki mesafe
ϵ	: Dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ^*	: Karmaşık düzlemde dielektrik sabiti
ϵ'	: Dielektrik sabitinin reel kısmı
ϵ''	: Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ρ	: Serbest elektrik yük yoğunluğu
ω	: Açısal frekans

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1.	Balon ve saçlar arasında meydana gelen triboelektrik etki	6
Şekil 2. 2.	Triboelektrik seri	8
Şekil 2. 3.	Nanogeneratörlerin doğuşu ve ilgili tarihi olaylar	9
Şekil 2. 4.	Örnek bir TENG modeli ve çalışma prensibi	12
Şekil 2. 5.	TENG'lerin dört temel çalışma modu: a) dikey temas-ayırma modu, b) yanal kayma modu, c) tek elektrotlu mod ve d) bağımsız triboelektrik katman modu	13
Şekil 3. 1.	TENG üretimi için seçilen dielektrik malzemeler	17
Şekil 3. 2.	a) Dielektrik kalınlığına ve b) dielektrik yüzey alanına bağlı olarak boyut optimizasyon eğrileri	18
Şekil 3. 3.	TENG üretiminde destek katmanı olarak kullanılan 5 mm kalınlıklı pleksi levha	19
Şekil 3. 4.	a) Dikey-çok hücreli TENG bağlantı şeması, b) yatay-çok hücreli TENG bağlantı şeması	22
Şekil 3. 5.	Dikey- çok hücreli TENG modeli	23
Şekil 3. 6.	Yatay-çok hücreli TENG modelinin açık ve kapalı görüntüsü	24
Şekil 3. 7.	Deney düzeneği: (1) pres makinesi, (2) TENG, (3) PLC kontrol paneli, (4) osiloskop, (5) LCR metre, (6) bilgisayar	25
Şekil 4. 1.	TENG'in eşdeğer devresi	28
Şekil 4. 2.	Farklı kalınlıktaki cam elyaflardan üretilen TENG'lerin: a) çıkış gerilimleri, b) 4 Hz mekanik darbe altında kapasitif yük gerilimleri, c) değişken omik yük altında maksimum güç değerleri, d) akım-voltaj karakteristikleri, e) değişken omik yük altında maksimum güç değerleri, f) orta kalınlıktaki cam elyaftan üretilen TENG'lerin değişken kapasitif yük altında çıkış gerilimleri	29

Şekil 4. 3.	Farklı boyutlardaki TENG'lerin: a) çıkış gerilimleri, b) akımları ve c) elektriksel güçleri; d) çeşitli darbe frekanslarında çıkış gerilimleri, e) akımları ve f) elektriksel güçleri; g) çeşitli darbe kuvvetleri altında çıkış gerilimleri, h) akımları ve i) elektriksel güçleri	31
Şekil 4. 4.	Dielektrik malzemenin: a) paralel RC eşdeğer devresi, b) akım fazör diyagramı	35
Şekil 4. 5.	Farklı boyutlardaki TENG'ler için: a) maksimum voltaj-yük eğrileri, b) enerji ve enerji yoğunluğu eğrileri, c) dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü eğrileri, d) kapasitans ve kapasitans yoğunluğu eğrileri, e) I-V karakteristikleri; f) 16 cm ² TENG için yüksek-frekans ve düşük-kuvvet yorulma testi sonuçları	37
Şekil 4. 6.	Dikey-çok hücreli TENG'in: a) 0,022 µF, b) 0,1 µF, c) 0,5 µF ve d) 1 µF kapasitif yük altında, farklı hücre sayılarındaki çıkış gerilimleri	40
Şekil 4. 7.	Yatay-çok hücreli TENG'in: a) 0,022 µF, b) 0,1 µF, c) 0,5 µF ve d) 1 µF kapasitif yük altında, farklı hücre sayılarındaki çıkış gerilimleri	42
Şekil 4. 8.	TENG hücrelerinin sayısına bağlı olarak çeşitli LED'lerin aydınlatma seviyeleri	43

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	100 N kuvvet ile 1 Hz, 2 Hz ve 3 Hz darbe frekansları altında çalıştırılan farklı boyutlardaki TENG'lerin gerilim, akım ve güç değerleri	32
Tablo 4.2.	100 N, 150 N ve 200 N mekanik kuvvet altında, 2 Hz darbe frekansı ile çalıştırılan farklı boyutlardaki TENG'lerin gerilim, akım ve güç değerleri	33



TRIBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLERDE ENERJİ YOĞUNLUĞUNU ARTIRMAK İÇİN DİELEKTRİK BOYUT OPTİMİZASYONU

ÖZET

Triboelektrik nanogeneratörler (TENG'ler), mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeline sahip yenilikçi cihazlar olarak son yıllarda büyük ilgi görmektedir. İnsan hareketi, rüzgâr veya dalga hareketi gibi doğal kaynaklardan faydalanarak enerji elde etme olanağı sunan TENG'ler, özellikle sürdürülebilir enerji çözümleri için umut vaat etmektedir. Küçük ölçekli uygulamalarda önemli başarılar elde edilmesine rağmen, büyük ölçekli TENG'lerin geliştirilmesi ve daha yüksek güç üretme kapasitelerine ulaşılması halen çözülmesi gereken bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Dielektrik malzemelerin boyutu ve konfigürasyonu da dahil olmak üzere, büyük ölçekli TENG'lerin performansını etkileyebilecek çeşitli faktörler bu zorluğun üstesinden gelmek için araştırılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, büyük ölçekli TENG'lerde hasat edilen elektrik güç yoğunluğunu artırmak için dielektrik malzemelerin kalınlık, yüzey alanı gibi boyutsal parametrelerini ve çok hücreli TENG konfigürasyonlarını optimize etmektir. Çalışmada pozitif dielektrik olarak cam elyaf, negatif dielektrik olarak ise yüksek tribo-potansiyeli, dayanıklılığı ve kolay erişilebilirliği nedeniyle çok amaçlı beyaz silikon kullanılmıştır. Boyut optimizasyonu aşamasında, farklı kalınlık ve yüzey alanlarına sahip dielektrikler ile TENG'ler üretilerek enerji toplama kapasiteleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Maksimum güç yoğunluğunu elde etmek için gerekli dielektrik kalınlıkları ve yüzey alanları belirlenmiştir. Daha sonra, boyutu optimize edilmiş dielektriklerin verimli bir şekilde entegre edilmesi için yatay ve dikey çok hücreli TENG konfigürasyonları incelenmiştir. Bu bağlamda, yatay ve dikey çok hücreli TENG yapıları tasarlanmış ve bu yapıların enerji üretim performansları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, dikey çok hücreli konfigürasyonların, yüzey alanı ve kalınlık optimizasyonları ile, enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Özellikle dikey çok hücreli konfigürasyonlar, elektronik cihazlar için yüksek ve sürdürülebilir bir enerji yoğunluğuna ulaşabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması, TENG'lerin enerji üretim kapasitelerini artırmak için boyut ve konfigürasyon optimizasyonunun önemini vurgulamakta ve gelecekteki büyük ölçekli TENG tasarımları için önemli bir referans oluşturarak enerji üretiminde daha sürdürülebilir çözümler geliştirmeye katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Triboelektrik nanogeneratör, yüksek güç yoğunluğu, dielektrik katman, boyut optimizasyonu, çok hücreli TENG.

OPTIMISATION OF DIELECTRIC SIZE TO INCREASE ENERGY DENSITY IN TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS

ABSTRACT

Triboelectric nanogenerators (TENGs) have attracted great interest in recent years as innovative devices with the potential to convert mechanical energy into electrical energy. TENGs, which offer the opportunity to obtain energy by utilising natural resources such as human movement, wind or wave motion, are particularly promising for sustainable energy solutions. Although significant success has been achieved in small-scale applications, the development of large-scale TENGs and achieving higher power generation capacities is still a problem to be solved. Several factors that can affect the performance of large-scale TENGs, including the size and configuration of dielectric materials, are being investigated to overcome this challenge.

The aim of this study is to optimise the dimensional parameters of dielectric materials such as thickness, surface area and multi-cell TENG configurations to increase the electrical power density harvested in large-scale TENGs. In the study, glass fibre was used as the positive dielectric and multipurpose white silicon was used as the negative dielectric due to its high tribo-potential, durability and easy accessibility. In the size optimisation stage, TENGs with dielectrics of different thickness and surface areas were fabricated and their energy harvesting capacities were examined in detail. The dielectric thicknesses and surface areas required to obtain the maximum power density were determined. Then, horizontal and vertical multi-cell TENG configurations are investigated for efficient integration of size-optimised dielectrics. In this context, horizontal and vertical multicell TENG structures are designed and their power generation performances are compared. Experimental results show that vertical multicell configurations can significantly improve energy efficiency with surface area and thickness optimisations. In particular, vertical multi-cell configurations reveal that a high and sustainable energy density can be achieved for electronic devices.

This thesis study highlights the importance of size and configuration optimisation to increase the power generation capacities of TENGs and contributes to the development of more sustainable solutions in power generation by providing an important reference for future large-scale TENG designs.

Keywords: Triboelectric nanogenerator, high power density, dielectric layer, size optimisation, multi-cell TENG.

1. GİRİŞ

Enerji, modern medeniyetin yapı taşıdır ve yaşamın her alanında yer almaktadır. Enerji yoktan var edilemez veya tamamen ortadan kaldırılamaz, yalnızca farklı biçimlere dönüştürülür. Enerji canlı ve cansız varlıklar arasında sürekli olarak değiş tokuş edilir. İnsanlar uyandıkları andan gece uykuya daldıkları ana kadar tüm eylemlerini çeşitli enerji formlarından aldıkları güçle gerçekleştirirler. Öte yandan sanayinin çarkını döndüren, şehirleri aydınlatan, evleri ısıtan, ulaşım araçlarını hareket ettiren ve iletişim sistemlerini ayakta tutan enerji, varlığın temelini oluşturur. Özellikle elektrik enerjisi, çağdaş toplumun can damarıdır. Hava ve su kadar önemli temel bir bileşen olup, yaşamın sürdürülebilirliği için kritik bir role sahiptir.

Elektrik enerjisi, sürdürülebilir çözümleri, karbon ayak izimizi azaltmayı ve iklim değişikliğiyle mücadele etmeyi amaçlayan yenilenebilir enerji teknolojilerinin ön saflarında yer almaktadır. Ancak, günümüzde hâlâ elektrik üretimi için büyük oranda fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar, milyonlarca yıl süren doğal süreçler sonucunda oluşan ve dünya enerji tüketiminin büyük bir kısmını karşılayan önemli enerji kaynaklarıdır. Bu yakıtlar; ulaşım, ısınma ve endüstriyel faaliyetler gibi çeşitli alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtların elektrik üretimindeki yaygın kullanımının nedenleri arasında, mevcut altyapının bu yakıtlara göre tasarlanmış olması, fosil yakıtların yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve ekonomik açıdan erişilebilir olmaları sayılabilir. Ayrıca, kesintisiz enerji üretimi sağladıkları için güvenilir bir kaynak olarak görülürler; oysa yenilenebilir enerji kaynakları, hava koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir ve mevcut depolama teknolojileri bu değişkenliği tamamen dengeleyecek seviyede değildir. Nitekim fosil yakıtların kullanımı, olumsuz çevresel etkileri ve sınırlı kaynak olmaları nedeniyle eleştirilmektedir. Bu nedenle, birçok ülke fosil yakıtların yerine temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunmakta ve çevresel zararları azaltmaktadır. Örneğin, 2014 yılında dünya genelinde elektrik üretiminde fosil yakıtlara bağlılık %67 civarındayken, 2023 yılı sonunda %60'a düştüğü görülmüştür. Türkiye’de ise bu oran sırasıyla %79 ve %58 olarak belirlenmiştir [1]. Bu

veriler, fosil yakıtların hala geniş çapta kullanıldığını göstermekle birlikte, yenilenebilir enerjiye geçişte artan bir eğilim olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekte, yenilenebilir enerji teknolojilerinin daha da gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesiyle fosil yakıtların kullanımının azalması beklenmektedir.

Son yıllarda hali hazırda kullanılan yenilenebilir enerji teknolojilerine yeni bir trend daha eklenmiştir. Bu yeni trend nanogeneratör olarak adlandırılmaktadır. Nanogeneratörler termal enerji veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen cihazlardır. Bu cihazlar özellikle düşük maliyetli ve çevre dostu olmaları nedeniyle büyük ilgi görmektedirler. Nanogeneratörler temel olarak üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar piezoelektrik nanogeneratör (PENG), piroelektrik nanogeneratör (PyENG) ve triboelektrik nanogeneratör (TENG) olarak adlandırılmaktadır [2–4]. PyENG’lerde elektrik üretimi termal enerji dönüşümüne dayanırken PENG ve TENG’lerde elektrik üretimi mekanik enerji dönüşümü ile yapılmaktadır. Bunlar arasında en ön plana çıkan nanogeneratör çeşidi TENG’lerdir. Bunun sebebi TENG’lerin diğer nanogeneratör türlerine nazaran daha yüksek verimliliğe sahip olmaları, geniş çapta bir malzeme çeşitliliğine sahip olmaları ve bu malzemelerin büyük bir çoğunluğunun düşük maliyetli olmasıdır. Triboelektrik malzemeler aynı zamanda esnek yapıya sahip olmaları nedeniyle de pek çok uygulama alanının da kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Triboelektrik malzemeler, birbiriyle temas edip ayrıldıklarında elektrik yükü kazanan veya kaybeden malzemelerdir. Bu etkiye triboelektrik etki denir ve bu etki sonucunda malzemeler pozitif veya negatif elektrik yükleriyle yüklenirler. Varlığı bilinen her malzeme triboelektrik etkiye sahiptir. Ancak bazı malzemeler daha yüksek etkiye sahip olup, temas ve ayrılma sonucunda büyük ölçüde yük alışverişinde bulunurlar. Bu malzemenin yük depolama yeteneğine, yani kapasitesine bağlıdır. TENG’lerin üretiminde malzeme seçimi, cihazın performansı ve verimliliği üzerindeki en belirleyici özelliktir [5], [6]. Bir TENG’in verimliliğini maksimize etmek için, yüksek triboelektrik yük yoğunluğu sağlayabilecek malzemeler seçilmelidir. Bunları belirleyebilmek için pek çok malzemenin yer aldığı çeşitli triboelektrik seriler oluşturulmuştur. Triboelektrik seride birbiriyle zıt uçlarda bulunan, genellikle biri elektronegatif diğeri elektropozitif karakteristiklere sahip malzemeler temas ettiklerinde ve ayrıldıklarında maksimum yük

transferi sağlamaktadırlar. Ayrıca, malzemelerin yüzey pürüzlülüğü ve esnekliği gibi özellikleri de enerji dönüşüm verimliliğinde önemli bir rol oynamaktadır.

Günümüzde TENG'lerin verimliliğini artırmak için yoğun çaba sarf edilmektedir. TENG'ler her ne kadar yenilenebilir enerji kaynağı olarak umut verici bir performans gösterse de kendi enerjisini sağlayan cihazlara entegrasyonları çeşitli teknik ve pratik engellerle karşı karşıyadır. Bu zorlukları çözmek, TENG'leri geleceğin elektronik cihazlarında kullanılmak üzere pratik ve etkili bir enerji kaynağı haline getirmek için çok önemlidir. Ayrıca bu cihazların şu an büyük ölçekli enerji üretiminde kullanılamamasının nedeni de verimlerinin düşük olmasıdır. Araştırmacılar, nanogeneratörlerin enerji hasat yeteneklerini geliştirmek için yeni malzemeler keşfetmeye ve mevcut malzemeleri geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu gelişmeler TENG'leri ticari açıdan daha uygulanabilir hale getirmeyi amaçlamakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişte kilit bir teknoloji olarak konumlandırmaktadır.

Bu tez çalışmasında TENG'lerin enerji yoğunluğunu artırmak adına, kullanılan dielektrik malzemelerin optimum boyutlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma, daha sonra bu optimum boyutlarda üretilen dielektriklerin yüksek verimli entegrasyonunu keşfetmek için yatay ve dikey çok hücreli TENG konfigürasyonlarına yönelmiştir. Beyaz silikon ve cam elyaf, yüksek tribo potansiyelleri ve uzun mekanik ömürleri nedeniyle sırasıyla negatif ve pozitif dielektrikler olarak seçilmiştir. Optimum dielektrik boyutlarının belirlenmesinde en yüksek çıkış gücü yoğunluğunu sağlayan dielektrik kalınlıkları belirlenmiştir. Daha sonra bu optimize kalınlıklar için en etkili yüzey alanları seçilmiştir. TENG katmanları için en etkili entegrasyon modelini keşfetmek için, boyutları optimize edilmiş dielektrikler kullanılarak hem yatay hem de dikey çok hücreli TENG'ler üretilmiştir. Çok hücreli TENG'ler tarafından üretilen enerji, farklı kapasitif yükler ve LED (ışık yayan diyot) uygulamaları için karşılaştırılmıştır. Bulgular, daha küçük boyutlu çok hücreli dielektriklerin, belirli bir temas alanı için daha büyük boyutlu tek hücreli dielektriklerden daha fazla enerji ürettiğini göstermektedir. Ayrıca, dikey çok hücreli tasarımlara sahip TENG'ler, yatay çok hücreli konfigürasyonlara sahip olanlara göre daha yüksek enerji verimliliği sergilemektedir. Bu bulgular, enerji hasadı uygulamaları için muazzam bir potansiyele sahip olan büyük ölçekli TENG'lerin tasarlanması ve optimize edilmesi için büyük önem arz etmektedir.

2. TRIBOELEKTRİK NANOGENERATÖRLER

TENG'ler, mekanik enerjiyi triboelektrifikasyon ve elektrostatik indüksiyon kombinasyonu aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren yenilikçi cihazlardır. Bu cihazlar, hareket enerjisini doğal veya yapay kaynaklardan alarak elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeline sahiptir. Özellikle enerji toplama ve kendi kendine güç sağlama ihtiyacı olan sistemler için devrim niteliğindedir. TENG'lerin temel çalışma prensibi, sürtünme veya temas yoluyla farklı malzemeler arasında elektrik yükü birikimi olan triboelektrifikasyon ve bu yüklerin ayrılması sonucu oluşan elektrostatik indüksiyona dayanır. Bu süreçte, iki malzemenin temas etmesi ve ardından ayrılmasıyla yüzey yükü üretilir ve bu yük, bir potansiyel fark oluşturur, bu da elektron akışını gerçekleştirerek elektrik üretimini sağlar [7].

TENG teknolojisi, mekanik enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilmesi nedeniyle çevresel enerji toplama uygulamaları için mükemmel bir seçenek olarak kabul edilmiştir. TENG'ler, taşınabilir elektronik cihazlar, giyilebilir teknoloji ve akıllı sensör ağları gibi alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Enerji dönüşüm verimliliğini artırmak için dikey temas-ayrılma modu, yanal kayma modu, tek elektrotlu mod ve bağımsız triboelektrik katman gibi yapısal tasarımlar geliştirilmiştir [8]. Bu cihazların etkinliği, kullanılan malzemelerin triboelektrik serideki konumlarına ve bu malzemelerin elektriksel yük toplama kapasitelerine göre değişir [9]. TENG'lerin çalışma mekanizmaları, çeşitli teorik modellerin geliştirilmesine yol açacak şekilde kapsamlı olarak incelenmiştir. Shao et al. [10], TENG'lerin elektrik üretimindeki etkinliğini artırmak için elektrostatik indüksiyon ve triboelektrik etkilerin nasıl optimize edilebileceğine dair değerli bilgiler sağlamıştır. Niu et al. [11] tarafından sunulan kayma modlu TENG modeli ise, farklı yüzey malzemelerinin triboelektrik yük oluşturma kapasitesini ve bu yüklerin elektrik enerjisine dönüşüm verimliliğini anlamada kritik bir rol oynamaktadır.

TENG'lerin esnek ve hafif yapısı, onları giysiye entegre etmek veya katlanabilir cihazlarda kullanmak için ideal kılar. Esnek TENG'lerin, sağlık izleme sistemlerini

çalıştırabilen ve günlük aktiviteler boyunca sürekli enerji sağlayabilen giyilebilir cihazlarda kullanımı vurgulanmaktadır. Bu cihazlar, kullanıcıların vücut fonksiyonlarını sürekli olarak izlemesine olanak tanırken, enerji ihtiyacını karşılamak için dış kaynaklara olan bağımlılığı azaltmaktadır. TENG'lerin geniş çapta uygulanabilmesi için malzeme dayanıklılığı, enerji dönüşüm verimliliği ve büyük ölçekli entegrasyon gibi konularda daha fazla gelişmeye ihtiyaç vardır. Dharmasena and Silva [12], çalışmalarında malzeme özelliklerini geliştirme, yüzey verimini iyileştirme ve TENG'leri diğer enerji hasat teknolojileriyle birleştiren hibrit sistemler geliştirme stratejilerini tartışmışlardır. Bu stratejiler, TENG'lerin performansını artırma ve daha geniş uygulama alanlarına uyum sağlama potansiyeline sahiptir. TENG'ler, sürdürülebilir enerji çözümleri ve kendi kendine güç sağlayan sistemler için umut verici bir yol olarak öne çıkmaktadır. Sürekli araştırma ve geliştirme çalışmaları, mevcut zorlukların üstesinden gelmek ve TENG'lerin çeşitli alanlardaki potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirmek için hayati öneme sahiptir. Ayrıca TENG'lerin ticarileştirilmesi ve endüstriyel ölçekte üretimi, bu teknolojinin geleceği için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, bu alandaki araştırma ve geliştirme faaliyetleri, geleceğin enerji sistemlerinin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

2.1. Triboelektrik ve Tarihçesi

Triboelektrik etki, iki farklı malzemenin teması sonucunda elektronların bir malzemedan diğerine geçişiyle meydana gelmektedir. Bu etki, malzemelerin elektronları çekme veya bırakma eğilimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmakta ve bu eğilimler, malzemelerin atomik yapısına bağlı olmaktadır. Elektronları daha kuvvetli çeken malzeme, elektron kazanarak negatif yüklenirken elektron veren malzeme pozitif yüklenmektedir. Bu süreç, malzemelerin atomik düzeydeki yapısal özelliklerine dayalı olarak gerçekleşmekte olup, malzemelerin yüzey özellikleri, temas süreleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörlerden de etkilenmektedir [13].

Triboelektrik etki, günlük yaşamda sıkça rastlanan bir durumdur ve statik elektriğin birçok gözlemlenebilir örneği ile ilişkilendirilebilmektedir [14], [15]. Örneğin, bir balonun saçlara sürtülmesi, balon ve saç arasında triboelektrik etkiyi ortaya çıkarmaktadır (Şekil 2.1). Bu durumda, balon negatif yüklenirken, saçlar pozitif yüklenmektedir.

yüklenmekte ve bu yük farklılığı saçların balona yapışmasına yol açmaktadır. Benzer şekilde, yün giysiler giyilip çıkarılırken, giysiler ile saçlar arasındaki sürtünme sonucunda saçlarda elektriklenme gözlemlenmektedir. Diğer bir örnek olarak, bir plastik çubuğun kâğıt parçalarına yaklaştırılması durumunda, çubuk ile kâğıt arasındaki triboelektrik etki nedeniyle çubuğun kâğıt parçalarını çektiği gözlemlenmektedir. Bu olaylar, triboelektrik etkinin günlük yaşamda yaygın olduğunu ve statik elektriklenmenin birçok örneğinin bu etki ile açıklanabileceğini göstermektedir.



Şekil 2. 1. Balon ve saçlar arasında meydana gelen triboelektrik etki [16]

Triboelektrik etki, aynı zamanda birçok endüstriyel uygulamada da kullanılmaktadır. Toz boya kaplama işlemlerinde, boyanın yüzeye yapışmasını sağlamak için triboelektrik etki kullanılmaktadır. Ayrıca fotokopi makinelerinde, tonerin kâğıda yapışmasını sağlamak için de triboelektrik etkiden yararlanılmaktadır. Liu et al. [17], yaptıkları araştırmada hava filtreleme sistemleri için de triboelektrik etkinin kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Bu etkinin anlaşılması ve kontrol edilmesi, malzeme bilimi ve elektrik mühendisliği alanlarında önemli bir araştırma konusudur.

Triboelektrik, çağlardan beri bilinmekte olup, özellikle antik Yunan döneminde yapılan gözlemlerle köklü bir geçmişe sahip olmuştur. Triboelektrik etkisinin tarihteki ilk kayıtlı örneği, MÖ 600 yıllarında yaşamış olan Miletli Thales'e dayanmaktadır. Thales, kehribarın kürk ile sürtünmesi sonucu statik elektrik yükü ürettiğini ve bu yükün hafif nesnelere çekme kapasitesine sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bu gözlem, statik elektriğin sistematik incelemesine öncülük etmiş ve elektrik biliminin gelişimine zemin hazırlamıştır [18].

18. yüzyılda, Charles-François de Cisternay Du Fay, antik Yunan filozofu Thales'in elektrikle ilgili gözlemlerini daha da ileriye taşıyarak, elektrik yüklerinin iki farklı türde olduğunu keşfetmiş ve bu yükler daha sonra 'pozitif' ve 'negatif' olarak isimlendirilmiştir. Bu ayırım, elektrik yüklerinin doğasını anlamada büyük bir adım olmuş ve Du Fay'ın bu keşfi, elektrostatik alanındaki çalışmaların gelişimine katkıda bulunarak, modern elektrik biliminin temellerini atmıştır [15]. Du Fay'ın yaptığı ayırım, elektrik yüklerinin nasıl birbirleriyle etkileşime girdiğini, nasıl hareket ettiğini ve nasıl kontrol edilebileceğini anlamamızı sağlamıştır.

Tarih boyunca triboelektrik ile ilgili gelişmeler çeşitli bilim insanlarının katkılarıyla devam etmiştir. Özellikle malzemelerin elektron alışverişindeki davranışlarını belirleyen ve bu özelliklerine göre bir sıra oluşturan triboelektrik serisinin ortaya çıkışı, bu alandaki araştırmalara yeni bir perspektif kazandırmıştır. Triboelektrik serisi sayesinde, statik elektriğin oluşumu ve kontrolü konusunda daha derinlemesine bilgiler elde edilmiş, bu bilgiler ışığında yeni teknolojilerin ve malzemelerin geliştirilmesine olanak tanınmıştır.

2.2. Triboelektrik Seri

Triboelektrik serisi, malzemelerin birbirleriyle temas ettiğinde elektron kazanma ya da kaybetme eğilimlerine göre sıralandığı bir sınıflandırma sistemidir. Bu seri, triboelektrik etkileşimlerin sonuçlarını öngörmekte kullanılan kritik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [19]. Bu yöntem, malzemeler arasındaki elektriksel etkileşimleri anlamada ve tahmin etmede bilim insanlarına büyük kolaylıklar sağlamış, triboelektrik etkilerin pratik uygulamalarını mümkün kılmıştır.

İlk triboelektrik seri, 1757 yılında İsveçli fizikçi Johan Carl Wilcke tarafından malzemelerin elektrostatik şarj davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla ortaya atılmıştır [20]. Ancak, triboelektrik serisi 20. Yüzyılda Shaw'ın altın yapraklı elektroskop kullanarak yaptığı deneyler sonucunda resmi olarak şekillenmiştir. Daha sonra araştırmacıların farklı malzemeler üzerinde yaptığı incelemeler sayesinde daha kapsamlı ve standartlaştırılmış bir seri oluşturulmuştur. Bu incelemeler, triboelektrik serinin uygulamalarını basit statik yük tahminlerinin ötesine taşımıştır. TENG'lerin üretiminde, triboelektrik malzeme seçimi son derece önem arz etmektedir. Malzeme seçimi yapılırken, malzemelerin triboelektrik serideki konumlarına dikkat edilmelidir. Şekil 2.2'de örnek bir triboelektrik seri gösterilmektedir.

Pozitif ↑	Anilin reçine		↓ Negatif
	Metil selüloz	Sert kauçuk	
	Melamin reçine	Nikel	
	İnsan teni	Bakır	
	Tavşan kürkü	Pirinç	
	Asbest	Gümüş	
	Asetat	Altın	
	Cam	Kükürt	
	Mika	Asetat rayon	
	İnsan saçı	Polivinilalkol	
	Naylon	Polyester	
	Yün	Stiren	
	Kürk	Orlon	
	Kurşun	Akrilik	
	İpek	Poliüretan	
	Selüloz	Polietilen	
	Alüminyum	Polipropilen	
	Kağıt	Kapton	
	Pamuk	Polietilenteraftalat	
	Çelik	Polivinilklorür	
Odun	Silikon		
Kehribar	Teflon		
Balmumu	Silikon kauçuk		
	Ebonit		

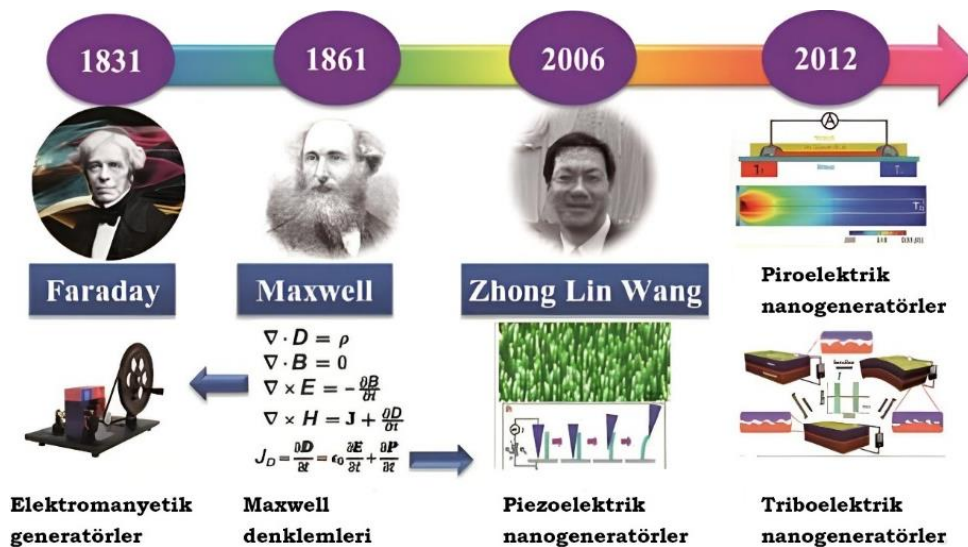
Şekil 2. 2. Triboelektrik seri

Seride yüksek pozisyonda yer alan malzemeler daha fazla pozitif yük kazanırken, alt sıralardaki malzemeler daha fazla negatif yük kazanmaktadır. Bu sebeple triboelektrik serinin en pozitif ve en negatif uçlarında yer alan malzemeleri seçmek, triboelektrik

yüklerin maksimum düzeyde transfer edilmesini sağlayacaktır. Seçilen malzemelerin mekanik dayanıklılığı, esnekliği ve çevresel koşullara karşı direnci gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. TENG'lerin tasarımında, malzeme seçimi aynı zamanda cihazın uygulama alanına ve çalışma ortamına uygun olmalıdır. Örneğin, giyilebilir teknolojilerde kullanılacak TENG'ler için hafif, esnek ve biyouyumlu malzemeler tercih edilirken, endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı ve sert malzemeler tercih edilmelidir. Son olarak, malzeme seçimi yapılırken ekonomik faktörler ve malzemenin bulunabilirliği de dikkate alınmalıdır. Yüksek verimlilik sağlayan ancak maliyeti yüksek olan malzemeler, tüketicinin bütçesine uygun olmayabilmektedir. Bu nedenle, malzeme seçimi yaparken hem teknik özellikler hem de maliyet etkinliği dengelenmelidir.

2.3. TENG'lerin Temel Teorisi

Generatörler, çeşitli formlardaki enerjii elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar aracılığı ile enerji dönüşümünün yapılması, teorik olarak Maxwell denklemlerine dayanmaktadır (Şekil 2.3). Generatörleri, elektromanyetik generatörler ve nanogeneratörler olarak iki grup altında inceleyecek olursak: Elektromanyetik generatörler, mekanik enerjii elektromanyetik indüksiyon yoluyla elektrik enerjisine dönüştürürken nanogeneratörler, mekanik enerjii elektrostatik indüksiyon aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürmektedir.



Şekil 2. 3. Nanogeneratörlerin doğuşu ve ilgili tarihi olaylar [18]

Elektromanyetik generatörler genellikle büyük boyutlu ve ağır yapıda olup rüzgâr türbinleri, hidroelektrik santralleri veya termal santraller gibi büyük ölçekli enerji üretim sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Öte yandan, nanogeneratörler çok küçük boyutlu ve hafif yapıda olan cihazlar olup mikro ve nano ölçekli enerji üretimi için tasarlanmışlardır. Bir nanogeneratör çeşidi olan TENG'lerde, tribo-çiftler birbiriyle temas edip ayrıldığında, her ikisi de triboelektrik etki nedeniyle zıt işaretli yükler üretmektedir. Eş zamanlı olarak elektrostatik indüksiyon etkisi altında elektrotlar üzerinde yükler indüklenmektedir. Metal elektrotlardaki yükler, potansiyel farkı dengelemek için harici devre üzerinden aktarılmaktadır. Bu, esasen Maxwell'in yer değiştirme akımı olan TENG'in çıkış akımını oluşturmaktadır [21]. Yer değiştirme akımı, yönlü bir hareket içinde hareket eden yüklerin neden olduğu akımdan ziyade, elektriksel yer değiştirme akısının zamana göre kısmi türevidir. Wang, TENG'lerin çıkış akımı ile yer değiştirme akımı arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak TENG'lerin çıkış akımının kökenini temel bir bakış açısıyla açıklamıştır [22]. Maxwell denklemleri, TENG çıktılarını öngörmek ve elde etmek için başvurulan temel denklemlerdir. Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\nabla \times \mathbf{D} = \rho \quad (\text{Gauss Yasası}) \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Gauss Manyetizma Yasası}) \quad (2.2)$$

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

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

Yukarıdaki denklemlerde Maxwell denklemlerini meydana getiren Gauss yasası, Gauss manyetizma yasası, Faraday yasası ve Ampere yasası verilmiştir. Burada elektrik alan \mathbf{E} , manyetik alan \mathbf{B} , manyetik alan şiddeti \mathbf{H} , serbest elektrik yük yoğunluğu ρ , serbest elektrik akım yoğunluğu \mathbf{J} , ve yer değiştirme alanı \mathbf{D} ile ifade edilmiştir. Bir elektromanyetik generatörün çıkış akımı, zamanla değişen manyetik alanın sonucu olarak ortaya çıkar ve $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ ile tanımlanır. Nanogeneratörlerin çıkış akımı ise Maxwell'in yer değiştirme akımı ile ilgilidir. Bu akım, polarize yüzey yüklerinden kaynaklanan polarizasyon alanındaki değişikliklere bağlı olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

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

Burada, \mathbf{P} polarizasyon alanı ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir. Bu ifadenin zamana göre türevi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

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

Burada \mathbf{J}_D yer değiştirme akımını ifade etmektedir.

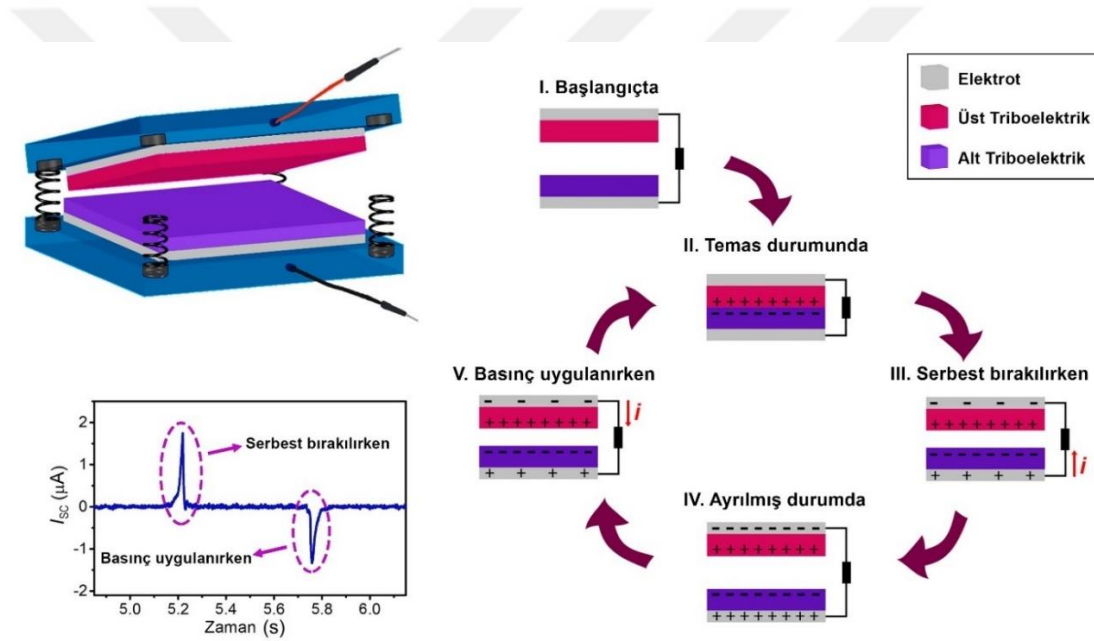
Yer değiştirme akımı, ilk olarak 1861 yılında Maxwell tarafından ortaya atılmıştır [23–25]. Bu kavram, manyetik alan için Ampere yasası ile elektrik yüklerinin süreklilik denklemi arasındaki tutarlılığı sağlamak amacıyla öne sürülmüştür. Yer değiştirme akımı, serbestçe hareket eden yüklerden oluşan bir elektrik akımı değil, zamanla değişen bir elektrik alanı ile atomlara bağlı yüklerin küçük hareketleri ve malzemelerdeki dielektrik polarizasyonundan kaynaklanan bir bileşendir.

2.4. TENG'lerin Çalışma Prensibi

TENG'lerin çalışma prensibi, triboelektrifikasyon ve elektrostatik indüksiyon olmak üzere iki temel fiziksel sürece dayanmaktadır. Triboelektrifikasyon, statik polarize yüklerin oluşumunu sağlarken, elektrostatik indüksiyon mekanik enerjiyi elektriğe dönüştüren ana bileşendir. Triboelektrifikasyon, iki farklı malzemenin temas etmesi sonucu elektronların bir malzemedan diğerine transfer olmasıyla gerçekleşmektedir. Bu süreç, malzemelerden birinin pozitif yük kazanmasına, diğerinin ise negatif yüklenmesine yol açmaktadır. Elektrostatik indüksiyon ise, bu yük ayrılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmakta ve malzemelerin ayrılmasıyla birlikte bir potansiyel fark oluşumunu sağlamaktadır. Bu iki kavramın birleşimi, TENG'lerin çevresel hareketlerden elektrik üretmesini mümkün kılmaktadır.

TENG'lerin çalışma mekanizması: temas elektriklenmesi, yük ayrılması, elektrostatik indüksiyon ve enerji hasadı gibi birkaç temel adımda incelenebilmektedir. Şekil 2.4, örnek bir TENG modelini ve çalışma prensibini göstermektedir. Burada ilk olarak, temas

elektriklenmesi sırasında iki farklı malzeme doğrudan birbirine temas eder. Bu temas, kullanılan triboelektrik malzemelerin, triboelektrik serilerinde bulunan konumlarına göre bir malzemeden diğerine elektron transferine yol açar. Sonuç olarak, malzemelerden biri pozitif yük kazanırken, diğeri negatif yükle yüklenir [26]. Temas elektriklenmesini takiben, iki malzeme birbirinden ayrılır ve bu ayrılma, yükler arasında bir potansiyel fark oluşmasına neden olur. Bu adım, malzemeler arasında bir elektrik alanı oluşturarak akım üretmek için gereklidir. Yük ayrılması olarak bilinen bu adımda, triboelektrik malzemelere elektrotlar bağlandığında bu potansiyel farkı, yükleri dengelemek için bir elektrottan diğerine elektron akışını teşvik eder. Bu elektron akışı, elektrik devresinde bir akım oluşturur ve bu akım, enerji hasadı sürecini başlatır [27].



Şekil 2. 4. Örnek bir TENG modeli ve çalışma prensibi

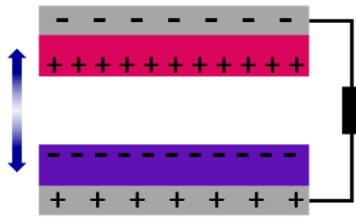
Elektrostatik indüksiyon süreci, TENG'lerin işleyişinde hayati bir rol oynar. Ayrılan yükler tarafından oluşturulan elektrik alanı, malzemelere elektrotlar bağlandığında, elektronları dış devre üzerinden hareket ettirir. Elektrik alanı nedeniyle elektronların bu hareketi, TENG'de elektrik üretimini sağlar. Hasat edilen enerji daha sonra kapasitörler veya pillerde depolanabilir ya da doğrudan elektronik cihazları beslemek için kullanılabilir [28]. Bu süreç, TENG'lerin çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilmesine olanak tanır. Örneğin düşük güçlü elektronik cihazların çalıştırılması, giyilebilir teknolojilerde enerji kaynağı olarak kullanılması veya uzaktan sensörlerin beslenmesi

gibi pek çok alanda TENG'lerin potansiyeli büyüktür. Ayrıca, TENG'lerin esnek ve hafif yapısı, onları pek çok farklı yüzeye ve koşula uyum sağlayabilir hale getirmekte ve bu da TENG'lerin pratik kullanım alanlarını genişletmektedir.

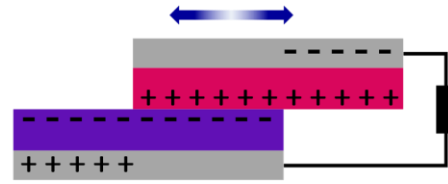
2.5. TENG'lerin Çalışma Modları

TENG'ler temas veya sürtünme etkisi ile uygulanan kuvveti, elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar uygulama alanlarına göre temel olarak, her biri farklı mekanik etkileşimlere dayalı enerji dönüşümünü optimize etmek için uyarlanmış dört farklı modda çalışabilmektedir. Bu modlar araştırmacılar tarafından dikey temas-ayırma modu, yanal kayma modu, tek elektrotlu mod ve bağımsız triboelektrik katman modu olarak belirlenmiştir [21], [29], [30]. Şekil 2.5'te TENG'lerin çalışma modları sırasıyla gösterilmektedir.

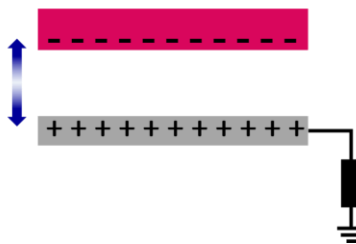
a) Dikey temas-ayırma modu



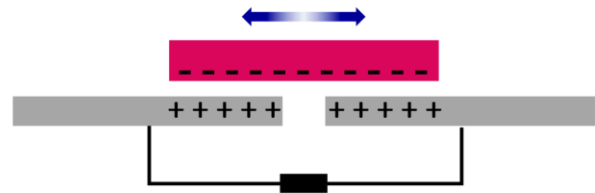
b) Yanal kayma modu



c) Tek elektrotlu mod



d) Bağımsız triboelektrik-katman modu



Şekil 2. 5. TENG'lerin dört temel çalışma modu: a) dikey temas-ayırma modu, b) yanal kayma modu, c) tek elektrotlu mod ve d) bağımsız triboelektrik-katman modu

2.5.1. Dikey Temas-Ayrırma Modu

Prof. Wang ve ekibinin 2012 yılında geliştirdiği dikey temas-ayırma modu, TENG'ler için tasarlanan ilk çalışma modu olarak bilinmektedir [31–33]. Bu mod, Şekil 2.5(a)'da gösterildiği gibi iki metal elektrot ve iki farklı triboelektrik malzeme içermektedir. Burada metal elektrotların biri üst triboelektrik malzeme ile sürekli temas halinde iken diğer metal elektrot, alt triboelektrik malzeme ile sürekli temas halindedir. TENG'e dikey doğrultuda bir kuvvet uygulandığında triboelektrik-çifti temasa geçer. Temas sırasında, elektron çekme kabiliyetlerindeki farklılıktan dolayı iki yüzeyde birbirine zıt elektrostatik yükler oluşur. Yüzeyler ayrıldığında ise bağlı oldukları elektrotlarda serbest yüklerin oluşmasına neden olur. Bu serbest yükler, dielektrik yüzeylerin tekrarlı temas-ayırılma hareketi devam ettikçe dış devrede akıma yol açar. Dikey temas-ayırma modlu TENG'lerde enerji hasadı bu şekilde gerçekleştirilir.

2.5.2. Yanal Kayma Modu

Yanal kayma modlu TENG'in temel yapısı dikey temas-ayırma modlu TENG ile aynıdır. Bu modlar arasındaki fark, Şekil 2.5(b)'de gösterildiği gibi üst katmanın farklı bir doğrultuda hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Yanal kayma modunda triboelektrik-çift tamamen üst üste biner ve birbirleriyle temas halinde olmaları sebebiyle yüzeyler arasında meydana gelen elektriklenme, triboelektrik malzemelerin yüzeylerinde zıt yüklerin oluşmasına yol açar. Üst katman kayma hareketi yaparken, temas yüzey alanı iki yüzeyin tamamen ayrılmasına kadar periyodik olarak azalacaktır. Bu kayma hareketi sırasında sürtünmeye bağlı olarak yüzeylerde periyodik bir yük ayrımı meydana gelir ve bu olay elektrik alanı oluşumuna yol açar. Oluşan elektrik alanı dolayısıyla elektrotlar arasında potansiyel fark meydana gelir ve elektrotlar arasında akım akmasına neden olur. Bu süreç yüzeyler birbirinden tamamen ayrılıncaya kadar devam eder. Üst katman geriye doğru kaydığı anda ise zıt yönde bir potansiyel fark oluşur ve triboelektrik-çift tamamen üst üste gelinceye kadar akım akmaya devam eder. Bu süreçte oluşan çıkış akımı, uygulanan kaydırma işleminin hızına bağlıdır [34].

2.5.3. Tek Elektrotlu Mod

Prof. Wang ve ekibi tarafından 2013 yılında geliştirilen tek elektrotlu mod; yukarıda verilen iki çalışma modunda olduğu gibi bir yük aracılığıyla iki elektrodun bağlanması yerine, Şekil 2.5(c)'de gösterildiği üzere topraklanmış tek bir elektrot içermektedir [35]. Bu yapıda ek olarak tek elektrot ile sürekli temas halinde olan bir triboelektrik katman ve bu katman ile elektriklenmeyi sağlayacak diğer bir hareketli triboelektrik katmandan oluşur. Hareketli katman sabit katman ile temas edip ayrılınca, dikey temas-ayırma modunda olduğu gibi triboelektrifikasyon ve elektrostatik indüksiyon olayları gerçekleşerek toprak ile elektrot arasında potansiyel fark oluşmasına neden olur. Tek elektrot modlu TENG'e temas-ayırma işlemi uygulandığı sürece toprak ile elektrot arasındaki potansiyel fark nedeniyle elektrottan toprağa ve topraktan elektroda olacak şekilde elektron akışı döngü halinde devam eder. Bu şekilde, toprak ve hareketli katmanın devirsel temas-ayırma hareketi, dış devre üzerinden akım akmasına yol açar. Tek elektrotlu moddaki bu enerji toplama stratejisi dikey temas-ayırma prensibi ile gerçekleştirilebildiği gibi yatay doğrultuda kayma hareketi ile de gerçekleştirilebilmektedir [36–38].

2.5.4. Bağımsız Triboelektrik-Katman Modu

Bağımsız triboelektrik katman modu ilk kez 2014 yılında Prof. Wang ve ekibi tarafından ortaya atılmıştır [35]. Bu mod kendi içerisinde temaslı-temassız veya birden fazla üst triboelektrik katman gibi farklı konfigürasyonlarda çalıştırılabilmektedir [39]. Şekil 2.5(d)'de bu modun tek triboelektrik katman ve temassız çalışan modeli gösterilmektedir. Burada triboelektrik katman, yatay doğrultuda yer alan iki elektrotun üzerinde, elektrotlar ile herhangi bir temas olmadan ileri-geri hareket eder. Hareketli triboelektrik katman, her iki elektrotta da farklı miktarlarda triboelektrik yük oluşumuna neden olur. Oluşan yük, elektrostatik indüksiyonun bir sonucu olarak, elektrotlar arasında bir potansiyel fark meydana getirir ve bu da elektrotlar arasında bir elektrik akımına yol açar. Bu modelde hareketli katmanın elektronlara doğrudan temasına gerek duyulmadığından, yüzeylerin aşınması büyük ölçüde azaltılabilmektedir [40]. TENG'lerin dayanıklılığını arttırmak adına bu çalışma modu iyi bir seçenektir ancak çıkış performansı diğer çalışma modlarına nazaran daha düşük olabilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. TENG İmalatı

TENG'ler, enerji dönüşümü teknolojileri alanında, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetleri ile dikkat çekmektedir. Bu teknolojinin en önemli avantajlarından biri, düşük malzeme maliyetleri ve üretim sürecinin basitliğidir. TENG'ler, genellikle polimer, metal ve kâğıt gibi ucuz ve yaygın olarak bulunan malzemelerle inşa edilebilirler. Özellikle plastik, kauçuk, cam veya tekstil gibi basit malzemeler, bu cihazların üretimi için idealdir. Bu malzemelerin kullanımı, üretim maliyetlerini minimize ederken, TENG'lerin geniş bir kullanım yelpazesi sunmasını sağlamaktadır. Ayrıca, TENG'lerin yapısı oldukça basit olduğundan, üretimi için yüksek teknolojiye sahip özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Tüm bu avantajlar, TENG'lerin düşük maliyetli ve geniş çapta üretimini mümkün kılmaktadır.

3.1.1. Dielektrik Malzeme Seçimi ve İmalatı

TENG'lerin keşfinden itibaren, dielektrik tabakaların üretimi için çeşitli malzemelerin kullanımı, bu alandaki araştırmaların merkezinde yer almaktadır. Bu malzemeler, elektriksel özellikleri optimize etmek ve cihaz performansını maksimize etmek amacıyla dikkatle seçilmiştir. Polimerler, seramikler ve kompozitler gibi geniş bir malzeme yelpazesi, dielektrik tabakaların üretiminde kullanılmış ve bu malzemelerin her birinin, triboelektrik etkiyi etkileyen benzersiz özellikleri bulunmaktadır. Örneğin, polimer bazlı malzemeler, esneklikleri ve yüksek dielektrik sabitleri nedeniyle tercih edilirken, seramikler yüksek sıcaklık ve yüksek gerilim uygulamalarında avantaj sağlamaktadır [41], [42]. Kompozit malzemeler ise, iki veya daha fazla malzemenin kombinasyonu, tek bileşenli malzemelerin sahip olmadığı özellikleri bir araya getirerek, TENG cihazlarının verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, nano yapılandırılmış malzemelerin kullanımı, yüzey alanını artırarak ve böylece triboelektrik yük üretimini maksimize ederek, TENG teknolojisinin gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur.

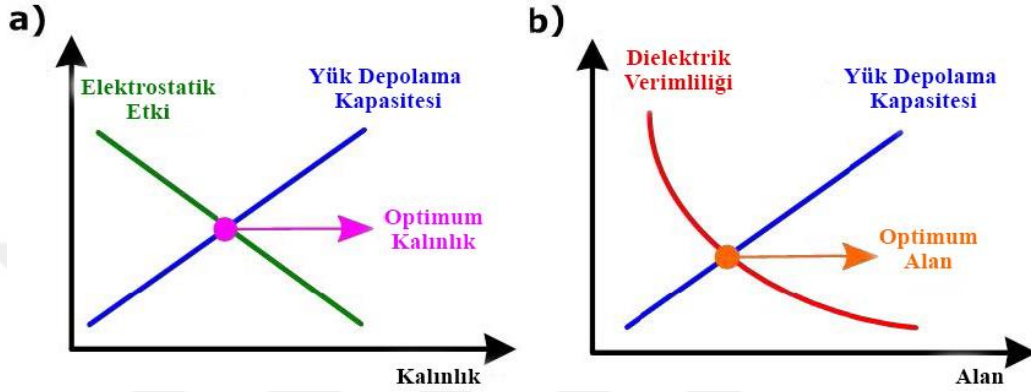
Son dönemlerde yapılan araştırmalar, dielektrik malzemeler olarak cam elyaf ve silikonun, yüksek triboelektrik potansiyelleri, kolay erişilebilirlikleri ve üstün darbe dayanıklılıkları ile dikkat çektiğini ortaya koymuştur [43–45]. Hava ile temas halinde kısa sürede katılaşma özelliği gösteren ticari beyaz silikon, çeşitli tasarımlara uyum sağlayabilme ve yüzey morfolojisini kolaylıkla modifiye edebilme kapasitesi ile negatif triboelektrik malzeme olarak öne çıkarken, pozitif triboelektrik malzeme olarak cam elyaf; esnek yapısı ve lifli dokusu sayesinde geniş yüzey alanı sunarak, katı cam malzemelere kıyasla daha yüksek pozitif triboelektrik potansiyeli sunmaktadır [46]. Bu çalışmada, dikey temas modunda çalışan TENG'lerin performansını maksimize etmek amacıyla, beyaz silikon ve cam elyaf kullanılmıştır. Bu malzemelerin görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3. 1. TENG üretimi için seçilen dielektrik malzemeler

Dielektrik malzemelerin kalınlığı, TENG'lerin performansını belirleyen önemli bir parametredir [44]. Daha ince dielektrik tabakalar, elektrostatik katmanlar arasındaki elektrik alan şiddetini artırarak daha yüksek bir çıkış voltajı sağlayabilmektedir [47]. Ancak, tabakalar inceldikçe malzemenin yük depolama kapasitesi de azalmaktadır (Şekil 3.2a). Ayrıca, aşırı ince tabakalar cihazın kararlılık ve dayanıklılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Buna karşılık, daha kalın bir dielektrik tabaka, katmanlar arasındaki mesafenin artması sebebiyle elektrik alan şiddetini azaltmakta ve bu da çıkış voltajının düşmesine yol açabilmektedir. Pozitif triboelektrik katman malzemesi olarak kullanılan

cam elyafın ideal kalınlığını belirlemek için, kalınlıkları 0.030 mm, 0.075 mm ve 0.150 mm olan üç farklı kalınlıktaki cam elyaf örneği kullanılmıştır. Piyasadan temin edilen farklı kalınlıktaki cam elyaflar, TENG üretiminde elektrot olarak kullanılan alüminyum folyo üzerine yüksek viskoziteli bir yapıştırıcı yardımıyla dikkatli bir şekilde sabitlenerek kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3. 2. a) Dielektrik kalınlığına ve b) dielektrik yüzey alanına bağlı olarak boyut optimizasyon eğrileri

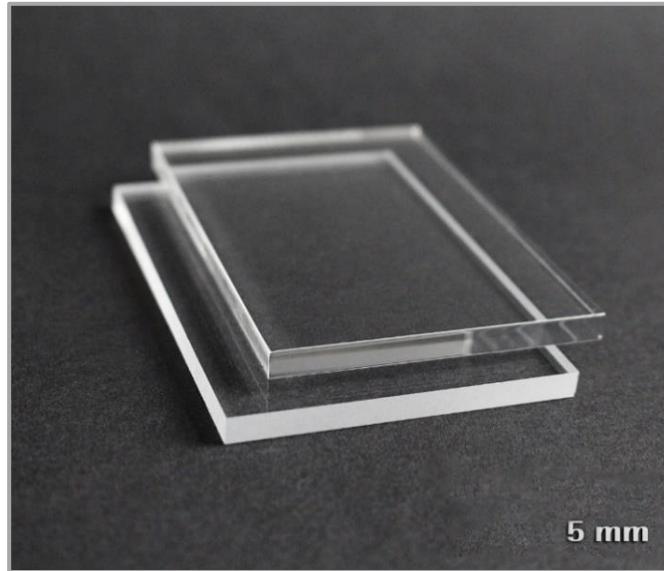
Dielektrik tabakaların etkin alanı, TENG performansını etkileyen bir diğer önemli faktör olarak öne çıkmaktadır (Şekil 3.2b). Daha büyük bir etkin dielektrik alan, triboelektrik katmanlar arasında yük transferini kolaylaştırmakta ve genellikle daha yüksek çıkış gerilimleri ve akımları ile sonuçlanmaktadır [48], [49]. Bu artan yük daha güçlü bir elektrik alanı oluşturarak, malzemenin daha yüksek bir performans sergileyebilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, dielektrik katmanın etkin alanının genişletilmesi daha yüksek dielektrik kayıplara ve parazitik kapasitanslara neden olarak dielektriklerin verimini düşürmekte, dolayısıyla TENG'lerin çıkış voltajını potansiyel olarak azaltabilmektedir [50], [51].

Silikonun triboelektrik katman olarak kullanılabilmesi için ince tabakalar halinde düzleştirilmesi ve kurutulması gerekmektedir. Okbaz et al. [44] tarafından yapılan bir araştırmada, farklı kalınlıklarda hazırlanan silikon tabakalı TENG'ler üzerinde deneyler yapılmış ve silikon tabakalar için optimum kalınlık 0,85 mm olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında da silikon tabakalar için 0,85 mm kalınlık esas alınarak bu optimum kalınlıktaki silikon tabakalar için ideal etkin alanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, yüzey alanları 4 cm², 9 cm², 16 cm², 25 cm² ve 36 cm² olan silikon tabakalar

hazırlamak için 3D yazıcı kullanılarak her bir yüzey alanına uygun, 0,85 mm kalınlığında, çerçeve şeklinde kare kalıplar üretilmiştir. 3D yazıcı ile üretilen bu kalıplar, silikon tabaka kalınlığındaki hassasiyetin artırılmasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Silikon tabakalar hazırlanırken, pürüzsüz yüzeye sahip olan bir cam üzerine, elektrot malzemesi olarak kullanılan alüminyum folyo yerleştirilmiştir. Folyonun üzerine yapıştırılan kalıplar içerisine beyaz silikon dökülerek bir ıspatula yardımıyla yüzeyi pürüzsüz hâle gelecek şekilde düzleştirilmiştir. Kalıplara dökülen silikonlar, tam olarak kurumaları için on iki saat boyunca bekletilmiştir.

3.1.2. Destek Katmanlarının Hazırlanması

TENG üretiminde kullanılan destek katmanları, sadece cihazın mekanik stabilitesini ve dayanıklılığını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda triboelektrik malzemelerin etkili bir şekilde çalışmasını da mümkün kılmaktadır. TENG'lerde destek katmanı olarak, esneklik ve dayanıklılık özelliklerinden ötürü, genellikle polimerler tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında destek katmanı olarak 5 mm kalınlığında pleksi levha kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3. 3. TENG üretiminde destek katmanı olarak kullanılan 5 mm kalınlıklı pleksi levha

Pleksi, polimetil metakrilat (PMMA)'dan türetilen bir sentetik polimerdir. Pleksi levhalar, yüksek darbe dayanıklılığı ve kırılma direnci ile cihazın mekanik streslere karşı

dirençli olmasını sağlamaktadır. Hafifliği ve kesme delme gibi şekillendirme işlemlerinde kolayca işlenebilir olması TENG üretim sürecini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, şeffaf bir malzeme olması, triboelektrik malzemelerin ve elektrotların görünürlüğünü artırarak, cihazın performansını analiz etmeyi ve görsel olarak değerlendirmeyi kolaylaştırmaktadır.

Destek katmanı olarak kullanılacak pleksi levhalar, üretimi yapılacak TENG cihazlarının triboelektrik malzeme boyutlarına göre uygun ölçülerde kesilmiştir. TENG cihazlarında, ayırma aşaması sırasında geri itme kuvvetini oluşturmak ve katmanların çalışma esnasında kaymasını engellemek amacıyla, pleksi levhaların dört köşesine çelik yaylar yerleştirilmek üzere kenarlarında birer santimetre boşluk bırakılmıştır. Her bir TENG için, alt ve üst katmanlar olmak üzere iki eşit pleksi levhaya ihtiyaç duyulmaktadır. Her iki pleksi levhanın dört köşesine, 8 mm çapında üst üste gelecek şekilde, matkap yardımıyla yay yuvaları açılmıştır. Levhaların tam ortasından 4 mm çapında ve yan tarafından birbiri ile kesişecek şekilde 1 mm çapında birer delik açılmıştır. Yandan açılan deliklere, TENG'in elektrotlarında biriken elektrik yükünü dış devreye aktarabilmek için kablolar yerleştirilmiş ve bu kablolar ortadaki deliklerden lehimlenerek, üzeri pleksi levha ile eşit seviyede olacak şekilde düzleştirilmiştir.

3.1.3. Dielektrik Boyut Optimizasyonu

Bu tez çalışmasında, Şekil 2.5'te bahsi geçen yay destekli, dikey temas-ayırma modlu TENG modeli esas alınarak TENG cihazlarının imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan TENG'ler, dielektrik kalınlık optimizasyonu, yüzey alanı optimizasyonu ve çok hücreli TENG'ler olmak üzere üç farklı kategoride incelenmiştir.

3.1.3.1. Kalınlık Optimizasyonu

Pozitif triboelektrik katman olarak kullanılan cam elyafın kalınlık optimizasyonu için üç farklı TENG imal edilmiştir. TENG imalatı için, daha önce alüminyum folyo üzerine yapıştırılan 0,030 mm, 0,075 mm ve 0,150 mm kalınlıktaki cam elyaflar, 4 cm x 4 cm boyutlarında kesilmiştir. Aynı ölçülerde, negatif triboelektrik katman olarak kullanılan silikon tabakalardan da üç adet alınmıştır. Bu pozitif ve negatif triboelektrik katman

malzemeleri, hazırlanan pleksi levhalar üzerine çift taraflı bant yardımıyla yapıştırılmıştır. Daha sonra iki pleksi levha arasına 8 mm çapında dört adet yay yerleştirilmiş ve çalışma sırasında katmanların kaymaması için her iki yandan ince bir bant ile sabitlenmiştir.

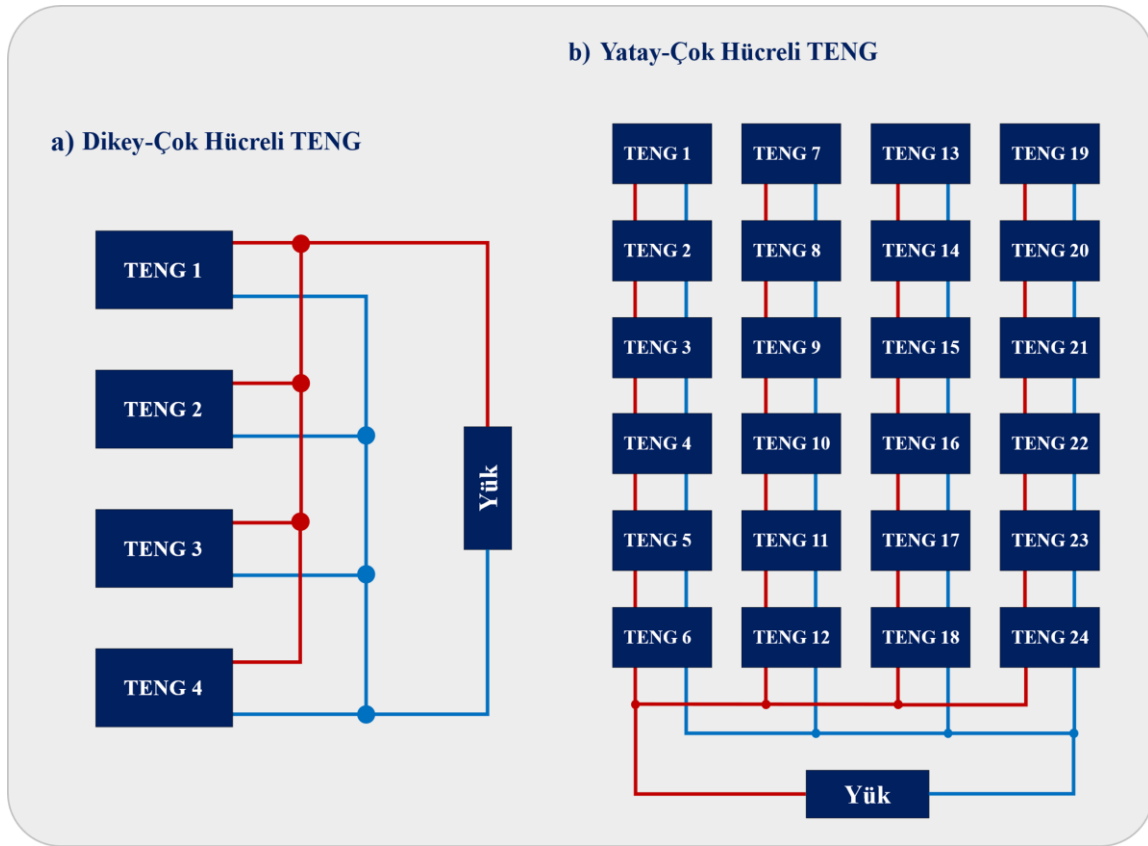
3.1.3.2. Yüzey Alanı Optimizasyonu

Yüzey alanı optimizasyonu için beş farklı ölçüde yüzey alanına sahip TENG'ler imal edilmiştir. Bunun için, daha önce hazırlanan 4 cm², 9 cm², 16 cm², 25 cm² ve 36 cm² yüzey alanına sahip silikon tabakalar kullanılmıştır. Aynı ölçülerde, optimum kalınlığı 0,075 mm olarak belirlenen orta kalınlıktaki cam elyaftan da beş adet kesilerek pleksi levhalar üzerine çift taraflı bant yardımıyla yapıştırılmıştır. Daha sonra, pleksi levhalar arasına yaylar yerleştirilmiş ve katmanların kaymaması için her iki yandan ince bir bant ile sabitlenmiştir.

3.1.4. Çok Hücreli TENG İmalatı

Çok hücreli TENG imalatı, enerji üretiminde yüksek güç çıkışı elde etme açısından önemli avantajlar sunmaktadır [52], [53]. Birden fazla hücreyi entegre ederek, her hücrenin toplam enerji üretimine katkıda bulunmasıyla TENG sisteminin çıkış gücü önemli ölçüde artırılabilen ve aynı miktarda mekanik girdiden daha yüksek verim elde edilebilmektedir. Tasarım ve uygulama esnekliği de çok hücreli TENG'lerin diğer bir avantajıdır; istenilen voltaj ve akım özelliklerine ulaşmak için çeşitli bağlantı şekilleri (seri, paralel veya hibrit) kullanılabilir.

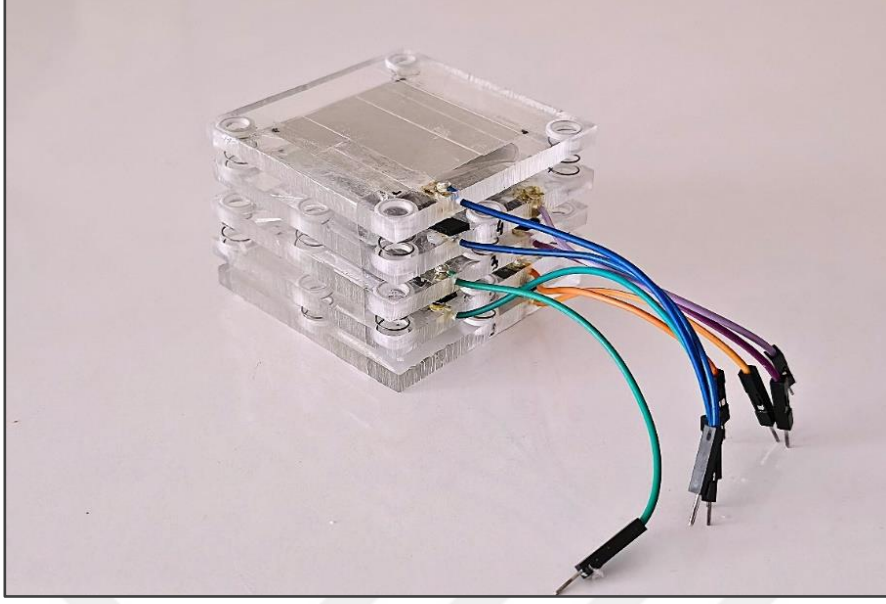
Bu çalışmada, çok hücreli TENG'lerin verimini araştırmak amacıyla dikey ve yatay konfigürasyonlu olmak üzere, iki ayrı çok hücreli TENG imal edilmiştir. Şekil 3.4, bu çok hücreli TENG'lerin bağlantı şemalarını göstermektedir.



Şekil 3. 4. a) Dikey-çok hücreli TENG bağlantı şeması, b) yatay-çok hücreli TENG bağlantı şeması

3.1.4.1. Dikey-Çok Hücreli TENG İmalatı

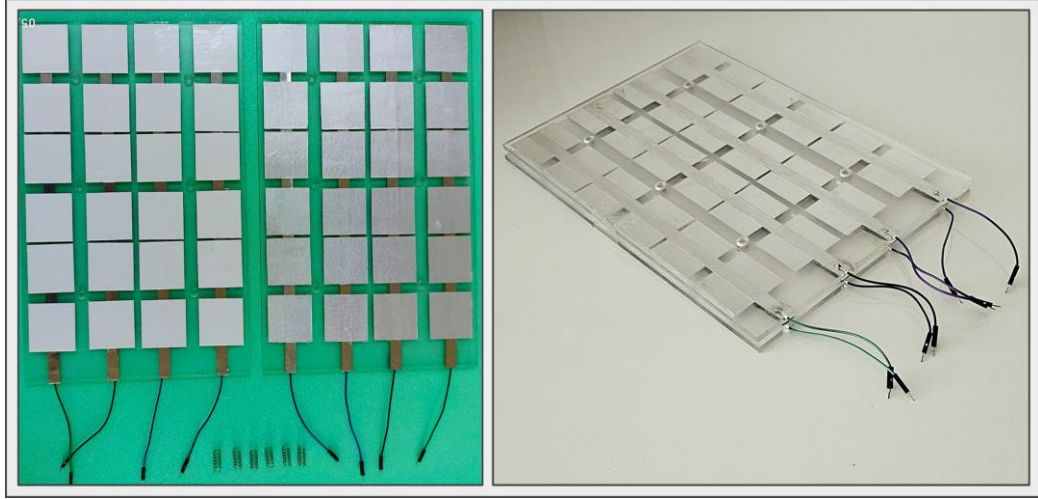
Çok hücreli TENG imalatında, kalınlık ve yüzey alanı optimizasyon araştırmalarında belirlenen 0,075 mm kalınlıktaki cam elyaf ile 16 cm² yüzey alanına sahip 4 cm x 4 cm ölçülerinde silikon tabakalar kullanılmıştır. Dikey-çok hücreli TENG’de üst üste olmak üzere toplamda dört adet TENG hücresi bulunmaktadır. Dikey-çok hücreli TENG imalatında, altta kalan yaylara fazla ağırlık yaparak katmanlar arasındaki boşluğun azalmaması için orta katmanlarda birer adet olacak şekilde toplamda beş adet pleksi levha kullanılmıştır. Kullanılan pleksi levhalar her iki yüzeyden triboelektrik malzemelerle temas halinde olacak şekilde delinerek lehimlenmiştir. Pleksi levhaların yüzeyine cam elyaf ve silikonlar çift taraflı bant yardımıyla yapıştırıldıktan sonra her bir levha çifti arasına dörder adet yay yerleştirilerek en alt ve en üstteki levhaları tutacak şekilde her iki yandan ince bir bant ile sabitlenmiştir. Dikey-çok hücreli TENG modeli Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



Şekil 3. 5. Dikey- çok hücreli TENG modeli

3.1.4.2. Yatay-Çok Hücreli TENG İmalatı

Yatay-çok hücreli TENG imalatında destek katmanı olarak 20 cm x 30 cm ölçülerinde iki adet pleksi levha kullanılmıştır. Bu TENG modelinde toplamda yirmi dört adet TENG hücresi bulunmaktadır. Hücreler arasında elektriksel bağlantıyı sağlamak amacıyla, pleksi levhaların yüzeyine dört adet 1 cm eninde alüminyum şeritler yapıştırılarak uç kısımlarına kablolar lehimlenmiştir. Triboelektrik katmanları yapıştırmak için bu şeritlerin her iki tarafına 1,5 cm eninde çift taraflı bantlar yerleştirilmiştir. Orta kalınlıktaki cam elyaf ve silikon tabakalardan 16 cm² yüzey alanına sahip kesitler alınarak, her bir alüminyum şerit üzerinde altılı gruplar olacak şekilde çift taraflı bantlar üzerine sabitlenmiştir. Pleksi levhalar arasına, triboelektrik katmanlara temas etmeyecek şekilde altı adet yay yerleştirilerek alt ve üst levha, çalışma sırasında olası kaymalara karşı dört bir yandan ince bantlarla sabitlenmiştir. Yatay-çok hücreli TENG modelinin açık ve kapalı durumdaki görselleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3. 6. Yatay-çok hücreli TENG modelinin açık ve kapalı görüntüsü

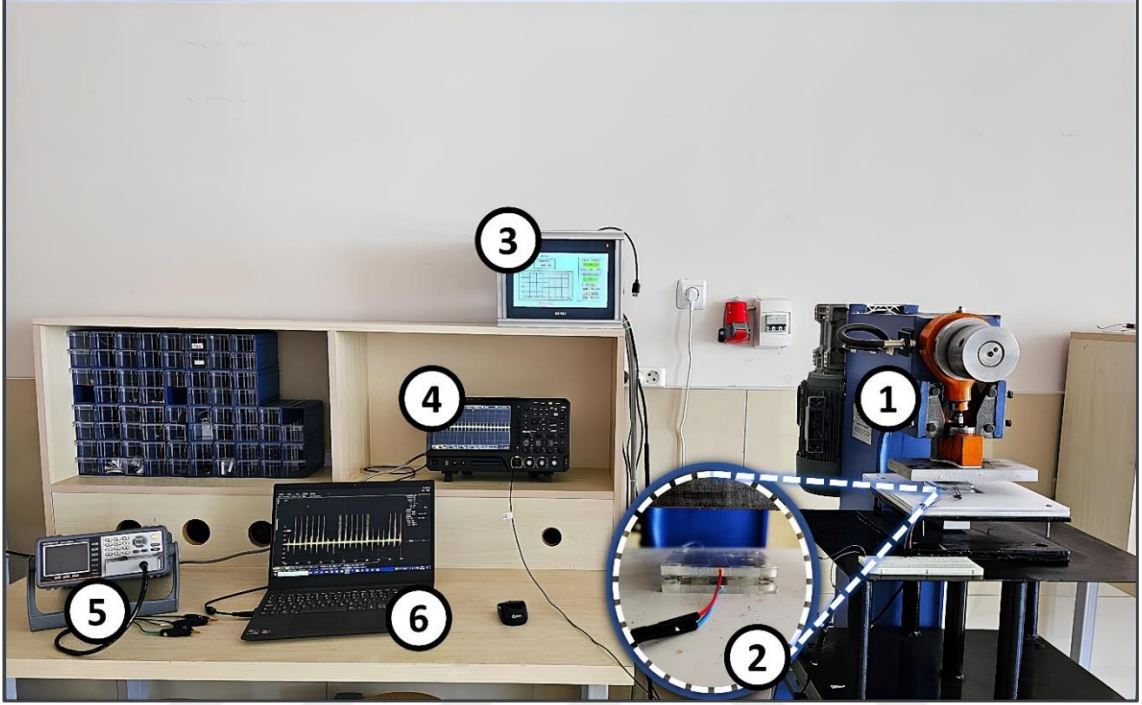
3.2. Ölçüm ve Karakterizasyon

TENG'lerin performansı, dielektrik malzemelerin özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, dielektrik malzemelerin tribo-potansiyelini etkileyen faktörlerin anlaşılması, TENG'lerin verimliliğini artırmak ve yeni uygulama alanları geliştirmek açısından önemlidir.

Bu çalışmada, çeşitli boyut ve kalınlıklardaki dielektrik malzemeler ile üretilen TENG'lerin performansını belirlemek amacıyla bir dizi deneysel analiz gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Deneylerde TENG'lere mekanik darbe uygulamak için özel olarak tasarlanmış bir pres makinesi kullanılmıştır. Makinenin darbe frekansı, bir programlanabilir mantıksal kontrolör (PLC) aracılığıyla ayarlanabilmektedir. Uygulanan darbe kuvvetini hassas bir şekilde ölçmek için Zemic L6E3 yük hücresi kullanılmaktadır. Pres makinesi tarafından uygulanan kontrollü frekans ve darbe kuvveti, ölçümlerin tutarlılığını ve güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca uzun süre tekrarlanabilir darbe uygulamaları sayesinde TENG'lerin dayanıklılık ve kararlılığını ölçmek için yorulma testlerinde kullanılmıştır.

TENG'ler tarafından üretilen çıkış gerilimlerini ölçmek için 10 M Ω iç dirence sahip Rigol MSO5104 osiloskop kullanılmıştır. Bu osiloskop, gerilim sinyallerinin zamana bağlı değişimini yüksek doğrulukla kaydederek, TENG'lerin performans analizine olanak

tanılmaktadır. Osiloskop ile elde edilen çıkış gerilimleri kullanılarak, TENG'lerin akım, güç, enerji ve toplam transfer yükü gibi parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Deney düzeneği: (1) pres makinesi, (2) TENG, (3) PLC kontrol paneli, (4) osiloskop, (5) LCR metre, (6) bilgisayar

TENG'ler tarafından üretilen akım, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_{TENG} = \frac{V_m}{R_{eq}} \quad (3.1)$$

Burada V_m ölçülen gerilim ve R_{eq} osiloskop probu arasındaki eşdeğer dirençtir. Hesaplamalar osiloskopun $10 \text{ M}\Omega$ olan direnci dikkate alınarak yapılmıştır.

TENG'ler tarafından üretilen güç aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_{TENG} = I_{TENG}^2 R_{eq} \quad (3.2)$$

Kapasitif yükteki toplam transfer yükü aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edilmiştir.

$$Q_{SC} = C_L V_m \quad (3.3)$$

Burada C_L kapasitif yükün değeridir. Kapasitörde depolanan enerji aşağıdaki eşitlik ile bulunmuştur.

$$E_s = \frac{1}{2} C_L V_m^2 \quad (3.4)$$

Ayrıca, TENG'lerin $I-V$ karakteristiğini ve kapasitans değerlerini ölçmek için bir GW Instek 6200 LCR metre kullanılmıştır. LCR metre ile elde edilen sonuçlar dielektriklerin geçirgenlik özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Karmaşık düzlemde dielektrik sabiti (ε^*), aşağıdaki denklemlerle tanımlandığı gibi bir reel kısma (ε') ve bir sanal kısma (ε'') ayrıştırılabilmektedir.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (3.5)$$

$$\varepsilon' = \frac{C_m}{C_0} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G_m}{\omega C_0} \quad (3.7)$$

Burada, ε' malzemenin elektrik enerjisi depolama yeteneğini ve ε'' malzemenin ısı olarak elektrik enerjisi kaybetme yeteneğini temsil etmektedir. C_m , C_0 , G_m ve ω sırasıyla ölçülen kapasitans, vakum kapasitansı, ölçülen iletkenlik ve açısal frekansa karşılık gelmektedir.

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (3.8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.9)$$

Ek olarak, A ve d dielektriğin alanını ve kalınlığını temsil etmektedir.

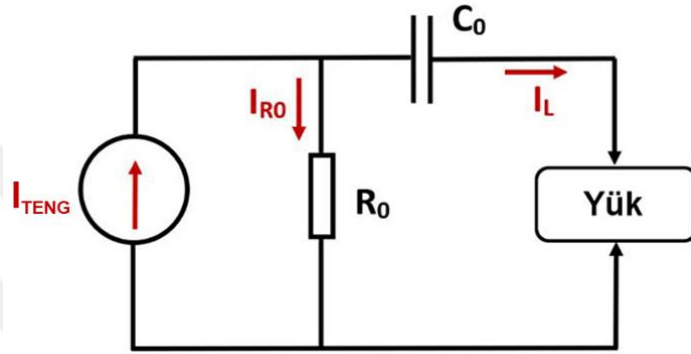
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Temas halinde malzemeler arasında elektron transferi ile karakterize edilen triboelektrik etki, enerji hasadı için umut vadeden cihazlar olan TENG'lerin temelini oluşturmaktadır. Tribo malzemelerin boyutlarını optimize etmek, TENG verimliliğini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak amacıyla dikey temas-ayırma modlu TENG'lerin temel bileşenleri olan silikon ve cam elyafın ideal boyutlarını araştırmaya odaklanmıştır.

4.1. Kalınlık Optimizasyonu

Şekil 4.2(a), 16 cm² yüzey alanına sahip üç farklı kalınlıktaki cam elyaftan üretilen TENG'lerden elde edilen çıkış voltajlarını göstermektedir. İnce, orta ve kalın cam elyafların kalınlıkları sırasıyla 0,030 mm, 0,075 mm ve 0,150 mm'dir. Cam elyafların kalınlığı piyasada sıklıkla bulunan ve en yüksek tribo-potansiyeli gösteren standart kalınlıklardan seçilmiştir. Mekanik darbe frekansı 2 Hz olarak ayarlanmış ve kısa devre koşulundaki ölçümler için darbe kuvveti 20 N olarak belirlenmiştir. İnce, orta ve kalın cam elyaftan üretilen TENG'ler için ilgili çıkış gerilimleri sırasıyla 87,7 V, 141 V ve 121 V olarak ölçülmüştür. Orta kalınlıkta cam elyaftan üretilen TENG'in en yüksek çıkış voltajını ürettiği, kalın cam elyafın ise ince olandan daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Orta kalınlıkta cam elyaftan üretilen TENG'in çıkış voltajı, ince ve kalın olanlara göre sırasıyla %66,6 ve %16,5 daha iyidir. TENG'lerin çıkış gücünü belirleyen kritik faktörlerden biri de yük karakteristiğidir. Yük empedansının genliğine ve açısına bağlı olarak, TENG'ler tarafından üretilen gücün maksimum değeri değişebilmektedir. Şekil 4.2(b), 4 Hz'lik bir darbe frekansında ve 22 nF'lik bir kapasitif yük altında TENG'lerin çıkış gerilimlerini göstermektedir. Kapasitif yükün maksimum gerilimleri sırasıyla 4,06 V, 4,63 V ve 4,40 V olarak ölçülmüştür. Kapasitif yük altında orta kalınlıktaki cam elyaftan üretilen TENG'in çıkış voltajı, ince ve kalın olanlardan sırasıyla %14 ve %5,2 daha yüksektir. Orta kalınlıktaki cam elyaftan yapılan TENG, kapasitif ve omik yükler altında en iyi şekilde çalışmaktadır. Ancak kapasitif yük altında çıkış gerilimindeki artış, omik yüke göre daha azdır. Şekil 4.1'de gösterilen TENG'in eşdeğer

devresi ile Eşitlik (4.1) ve (4.2)'deki ifadeler, dielektriklerin karakteristik parametreleri ile TENG'lerin çıkış gerilimi arasında doğrusal bir ilişki olmadığını açıklamaktadır [54], [55]. Farklı kalınlıklardaki cam elyaflar, TENG'lerin eşdeğer direncinde ve kapasitansında değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişimler, yükün empedans değerine bağlı olarak çıkış voltajını farklı oranlarda etkilemektedir. Sonuç olarak, omik ve kapasitif yüklerde gözlenen çıkış gücündeki değişim oranı, çeşitli dielektrikler kullanan TENG cihazlarında farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 4. 1. TENG'in eşdeğer devresi

Eğer devreye omik bir yük bağlanırsa, çıkış gerilimi V_{RL} aşağıdaki gibi ifade edilir.

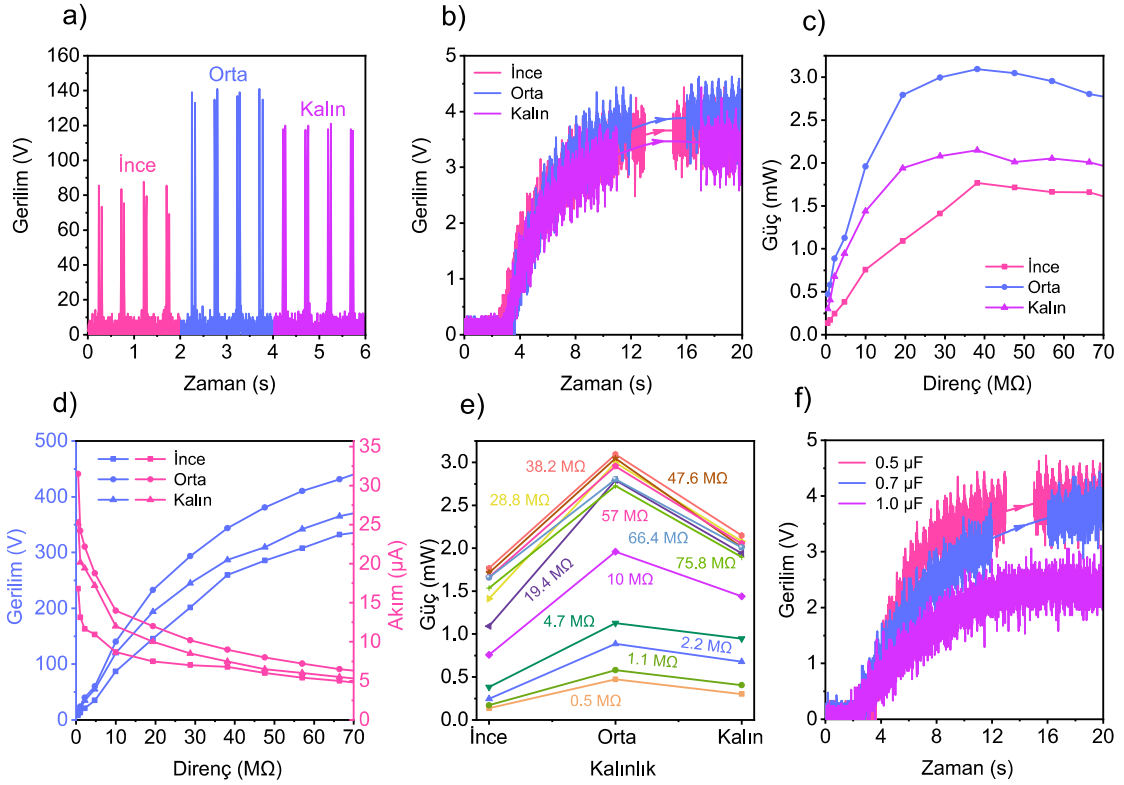
$$V_{RL} = \frac{I_{TENG} R_0 R_L}{R_0 + \sqrt{R_L^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_0}\right)^2}} \quad (4.1)$$

Burada, I_{TENG} TENG tarafından üretilen akımı, R_0 dielektrikler arasındaki elektrik direncini, R_L devreye bağlı yük direncini, C_0 TENG'in kapasitansını ve f çalışma frekansını temsil etmektedir. Eğer devreye kapasitif bir yük bağlanırsa, çıkış gerilimi V_{CL} aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_{CL} = \frac{I_{TENG} R_0}{2\pi f C_L R_0 + \frac{C_L}{C_0} + 1} \quad (4.2)$$

Burada C_L , devreye bağlı kapasitif yükün kapasitans değerini temsil etmektedir.

TENG'ler tarafından üretilen maksimum güç, yük karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.2(c), 2 Hz'lik bir darbe frekansında ve farklı omik yükler altında TENG'ler tarafından üretilen maksimum güç eğrilerini göstermektedir. TENG'ler tarafından 38,2 M Ω eşdeğer direnç altında üretilen maksimum güçler ince, orta ve kalın cam elyaflar için sırasıyla 1,77 mW (1,1 W/m²), 3,10 mW (1,94 W/m²) ve 2,15 mW (1,34 W/m²)'tır. Orta kalınlıktaki cam elyaflı TENG, tüm yük değerleri için en yüksek çıkış gücünü sağlamıştır.



Şekil 4. 2. Farklı kalınlıktaki cam elyaflardan üretilen TENG'lerin: a) çıkış gerilimleri, b) 4 Hz mekanik darbe altında kapasitif yük gerilimleri, c) değişken omik yük altında maksimum güç değerleri, d) akım-voltaj karakteristikleri, e) değişken omik yük altında maksimum güç değerleri, f) orta kalınlıktaki cam elyaftan üretilen TENG'lerin değişken kapasitif yük altında çıkış gerilimleri

Şekil 4.2(d), farklı omik yükler altında TENG'lerden elde edilen maksimum çıkış voltajlarını ve akım değerlerini göstermektedir. İnce, orta ve kalın cam elyafların 66,4 M Ω direnç ile elde edilen maksimum çıkış gerilimleri sırasıyla 332 V, 431,6 V ve 365,2 V'tur. İnce, orta ve kalın cam elyaflar için 0,5 M Ω direnç ile elde edilen maksimum akım değerleri sırasıyla 16,8 μ A, 31,5 μ A ve 25,2 μ A'dır. Şekil 4.2(e) farklı omik yükler altında elde edilen maksimum güç değerlerini göstermektedir. Her üç TENG'den elde

edilen maksimum güç değerleri 38,2 MΩ dirençli yükte sırasıyla 1,77 mW, 3,10 mW ve 2,15 mW olarak gözlemlenmiştir. Son olarak Şekil 4.2(f), orta kalınlıkta cam elyaftan üretilen TENG'den, farklı kapasitif yükler altında elde edilen çıkış gerilimlerini göstermektedir. Elde edilen maksimum çıkış gerilimleri, 0,5 µF, 0,7 µF ve 1 µF kapasitif yükler için sırasıyla 4,59 V, 4,44 V ve 3,11 V olarak gözlemlenmiştir.

Dielektrik malzemenin kalınlığı, kapasitörlerde depolanan enerji miktarını etkileyen çok önemli bir faktördür. Aşağıdaki eşitlik dielektrik kalınlığı ile elektrostatik etki arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

$$E = \frac{V_i}{d} \quad (4.3)$$

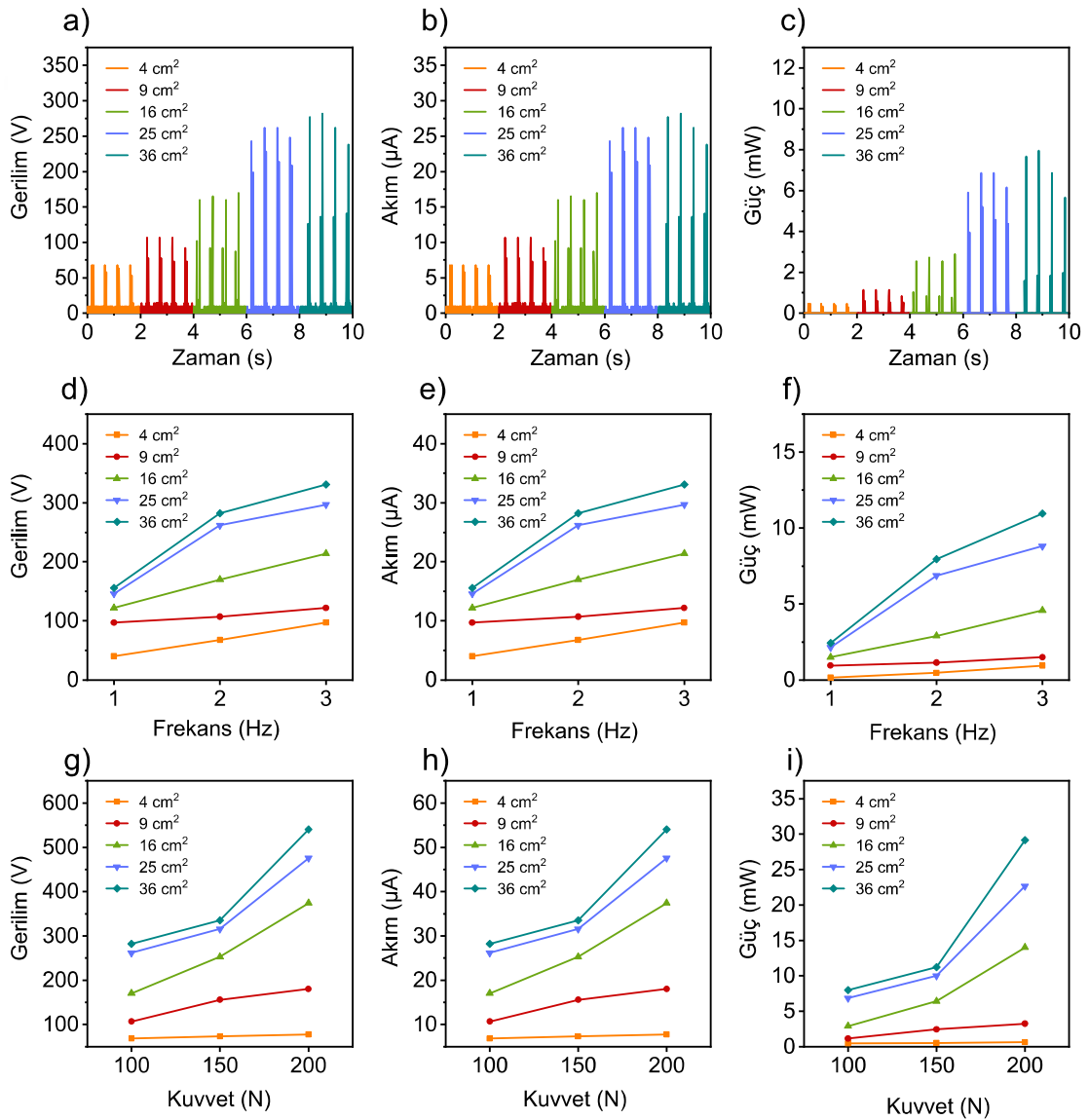
Burada E elektrik alan şiddetini, V_i uygulanan gerilimi ve d dielektrik kalınlığını temsil etmektedir.

Kapasitörlerdeki dielektrik kalınlığının artırılması, kapasitör plakaları arasındaki elektrostatik etkiyi azaltmakta, dolayısıyla kapasitörde depolanan enerji de azalmaktadır. Bununla birlikte, dielektrik üzerindeki elektrik yükü miktarı, aktarılan yük miktarını etkileyen birincil faktör olarak bilinmektedir. Elektrostatik etkiyi artırmak için dielektrik kalınlığının çok fazla azaltıldığını varsayarsak, dielektriklerin yük tutma potansiyeli azalacak ve ardından TENG'lerin çıkış voltajı düşecektir. Özellikle cam elyaflar gibi lifli yapıya sahip çok ince dielektrikler, kaçak akımların artmasına ve TENG'lerin performansının düşmesine neden olacaktır. Bu nedenle, dielektrik kalınlığını optimize etmek, TENG'lerin enerji yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmak için son derece önem arz etmektedir [56].

4.2. Yüzey Alanı Optimizasyonu

Şekil 4.3, farklı boyutlardaki TENG'lerin çeşitli darbe frekanslarındaki ölçüm sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 4.3(a) beş farklı dielektrik yüzey alanına (4 cm², 9 cm², 16 cm², 25 cm² ve 36 cm²) sahip TENG'lerin 100 N kuvvet ve 2 Hz frekanslı mekanik darbe altındaki çıkış gerilimlerini göstermektedir. Ölçülen maksimum gerilimler sırasıyla 68 V,

107 V, 170 V, 262 V ve 282 V'tur. Maksimum gerilimlerin TENG'lerin boyutuyla birlikte artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.3(b), farklı boyutlardaki TENG'ler tarafından üretilen gerilim değerleri kullanılarak hesaplanan ve sırasıyla 6,8 μA , 10,7 μA , 17 μA , 26,2 μA ve 28,2 μA 'e karşılık gelen maksimum akım değerlerini göstermektedir. TENG'lerin boyutu arttıkça akım değerlerinin de yükseldiği görülmektedir. Bu akım, gerilim değerlerine bağlı olarak üretilen güçler Şekil 4.3(c)'de gösterildiği gibi, 0,46 mW, 1,14 mW, 2,89 mW, 6,86 mW ve 7,95 mW olarak hesaplanmıştır. Büyük TENG'lerdeki güç artışı, akım ve gerilim değerleriyle orantılı olarak artış göstermiştir.



Şekil 4. 3. Farklı boyutlardaki TENG'lerin: a) çıkış gerilimleri, b) akımları ve c) elektriksel güçleri; d) çeşitli darbe frekanslarında çıkış gerilimleri, e) akımları ve f) elektriksel güçleri; g) çeşitli darbe kuvvetleri altında çıkış gerilimleri, h) akımları ve i) elektriksel güçleri

Şekil 4.3(d-f), 100 N kuvvet ile 1 Hz, 2 Hz ve 3 Hz'lik darbe frekansları altında çalıştırılan farklı boyutlardaki TENG'lerden elde edilen gerilim, akım ve güç değerlerini göstermektedir. Bu değerler Tablo 4.1'de detaylı olarak verilmiştir. Frekans artışının, TENG'in çıkış parametrelerini doğrusal olarak iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1. 100 N kuvvet ile 1 Hz, 2 Hz ve 3 Hz darbe frekansları altında çalıştırılan farklı boyutlardaki TENG'lerin gerilim, akım ve güç değerleri

Yüzey Alanı (cm ²)		4	9	16	25	36
1 Hz	Gerilim (V)	40,1	97,2	122	146	156
	Akım (µA)	4,01	9,72	12,2	14,6	15,6
	Güç (mW)	0,16	0,94	1,49	2,13	2,43
2 Hz	Gerilim (V)	68	107	170	262	282
	Akım (µA)	6,8	10,7	17	26,2	28,2
	Güç (mW)	0,46	1,14	2,89	6,86	7,95
3 Hz	Gerilim (V)	97,2	122	214	297	331
	Akım (µA)	9,72	12,2	21,4	29,7	33,1
	Güç (mW)	0,94	1,49	4,58	8,82	10,96

Sonuçlar, darbe frekansı ile TENG'lerin elektriksel parametreleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bir TENG'in çıkış gerilimi darbe frekansı ile artmaktadır çünkü daha sık temas-ayırma döngüleri, daha yüksek oranda yük üretmekte ve yüzeylerdeki yük yoğunluğunu artırarak daha büyük bir potansiyel fark oluşumuna yol açmaktadır. Darbeler arasındaki daha kısa zaman aralıkları yük rekombinasyonunu azaltarak da daha fazla yük tutmakta ve bu da çıkış geriliminin artmasını sağlamaktadır. Ek olarak, daha yüksek frekanslardaki hızlı mekanik hareket, yük aktarımı ve ayrılmasının etkinliğini artırırken, üst üste binen voltaj darbelerinin kümülatif etkisi, daha

yüksek bir ortalama voltaj çıkışına katkıda bulunmaktadır. Tüm bu birleşik faktörler, dikey temas-ayırma modlu TENG'ler için darbe frekansı arttıkça, daha yüksek bir çıkış gerilimi elde edileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.3(g-i), farklı boyutlardaki TENG'lerden 100 N, 150 N ve 200 N mekanik kuvvet altında elde edilen elektriksel parametreler arasındaki ilişkileri göstermektedir. Darbe frekansı tüm kuvvet seviyeleri için 2 Hz'de sabitlenmiştir. TENG'lerden elde edilen elektriksel parametreler Tablo 4.2'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.2. 100 N, 150 N ve 200 N mekanik kuvvet altında, 2 Hz darbe frekansı ile çalıştırılan farklı boyutlardaki TENG'lerin gerilim, akım ve güç değerleri

Yüzey Alanı (cm²)		4	9	16	25	36
100 N	Gerilim (V)	68	107	170	262	282
	Akım (μA)	6,8	10,7	17	26,2	28,2
	Güç (mW)	0,46	1,14	2,89	6,86	7,95
150 N						
150 N	Gerilim (V)	72,9	156	253	316	335
	Akım (μA)	7,29	15,6	25,3	31,6	33,5
	Güç (mW)	0,53	2,43	6,4	9,99	11,22
200 N						
200 N	Gerilim (V)	77,8	180	374	476	540
	Akım (μA)	7,78	18	37,4	47,6	54
	Güç (mW)	0,61	3,24	13,99	22,66	29,16

Çıkış gerilimindeki iyileşmenin büyüklüğü TENG'lerin boyutuyla doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır. Örneğin, 4 cm² yüzey alanına sahip TENG'in 100 N ve 200 N kuvvet seviyeleri altındaki çıkış gerilimleri sırasıyla 68 V ve 77,8 V olup %14,4'lük bir gerilim iyileşmesine işaret etmektedir. Bununla birlikte, 36 cm² yüzey alanlı TENG için, 100 N ve 200 N kuvvet seviyeleri altındaki çıkış gerilimleri sırasıyla 282 V ve 540 V'tur ve

%91,5'lik bir gerilim geri kazanımı göstermektedir. Öte yandan 4 cm² yüzey alanlı TENG için akım değerleri 100 N ve 200 N kuvvetler altında sırasıyla 6,80 µA ve 7,78 µA'dır. Uygulanan kuvvet iki katına çıkmasına rağmen akım artışı %14,4'tür. Benzer şekilde, 36 cm² yüzey alanlı TENG için 100 N ve 200 N kuvvetler altında elde edilen akım değerleri sırasıyla 28,2 µA ve 54 µA'dır. Uygulanan kuvvet iki katına çıkarken, üretilen akım %92,9 daha yüksektir. Bu sonuç, küçük boyutlu TENG'lerin maruz kaldığı birim alan başına daha yüksek basınca bağlanabilmekte ve bu da onları kuvvet doygunluk noktalarına yaklaştırmaktadır. Genel olarak, etkin yüzey alanı genişledikçe uygulanan kuvvetin orantılı olarak artmasının, TENG'in performansını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.

Dikey temas-ayırma modlu TENG'lerin çıkış gerilimi; ortam sıcaklığı, nem, dış kuvvetin genliği, dielektrik malzeme özellikleri ve etkin temas yüzey alanı dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Sabit çevresel koşullar varsayıldığında, TENG'lerin çıkış voltajı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{OUT} = -\frac{1}{C(x)}Q_{SC}(x) + V_{OC}(x) \quad (4.4)$$

Burada Q_{SC} transfer yükü, C etkin kapasitans, V_{OC} açık devre voltajı ve x iki dielektrik arasındaki mesafedir. Kısa devre durumu için denklem ($V = 0$) aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$Q_{SC}(x) = C(x)V_{OC}(x) \quad (4.5)$$

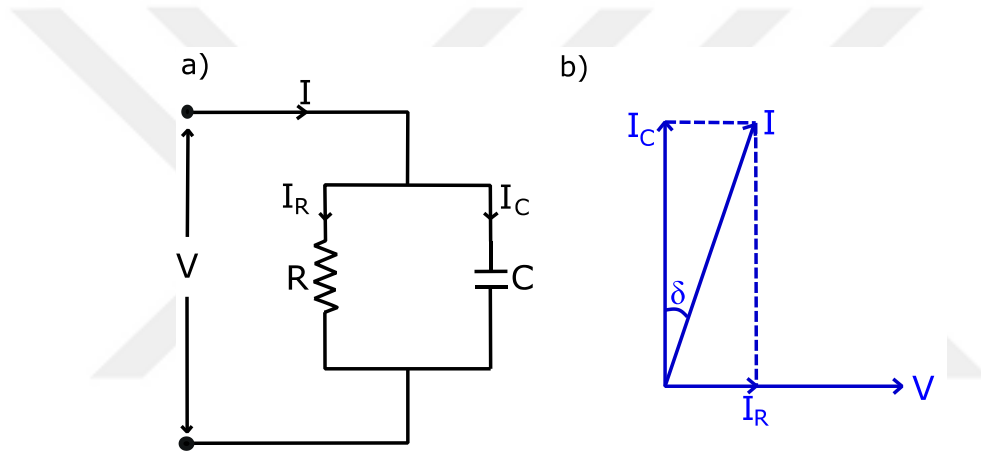
$C(x)$, TENG'lerin akım çıkışının belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Etkin kapasitans aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (4.6)$$

Burada ϵ dielektrik sabiti, A yüzey alanı ve d dielektrik kalınlığıdır.

Eşitlik (4.5) ve (4.6)'dan görülebileceği gibi, ε/d oranını ve A 'yı artırmak, TENG'lerin çıkış gücünü iyileştirmenin iki temel stratejisidir. Bununla birlikte, A değerinin artırılması, dielektrik kayıplar nedeniyle TENG'lerin çıkış gücünü sınırlı bir aralıkta iyileştirebilmektedir.

Dielektrik kayıplarını etkileyen birçok faktör vardır ve bunları belirlemek için kapasitörlerin matematiksel modeli kullanılabilir. Şekil 4.4, bir dielektrik malzemenin paralel RC eşdeğer devresini ve akım fazör diyagramını göstermektedir. R dielektrik kayıplara neden olan omik direnci, C ise dielektrik malzemenin yük depolama kapasitesini ifade etmektedir.



Şekil 4. 4. Dielektrik malzemenin: a) paralel RC eşdeğer devresi, b) akım fazör diyagramı

Dielektrik kaçak akımını (I_R) ve yük akımını (I_C), fazör diyagramı kullanılarak yazılabilir.

$$I_R = I_C \cdot \tan(\delta) \quad (4.7)$$

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \omega \cdot C \cdot V \quad (4.8)$$

Bu durumda, eşitlik 4.7'de elde edilen I_C , eşitlik 4.8'de yerine konur;

$$I_R = \omega \cdot C \cdot V \cdot \tan(\delta) \quad (4.9)$$

eşitliği elde edilir.

Dielektrik kayıplar (P_L) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_L = V \cdot I_R \quad (4.10)$$

$$P_L = V \cdot \omega \cdot C \cdot V \cdot \tan(\delta) \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11) basitleştirilerek dielektrik kayıplar aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

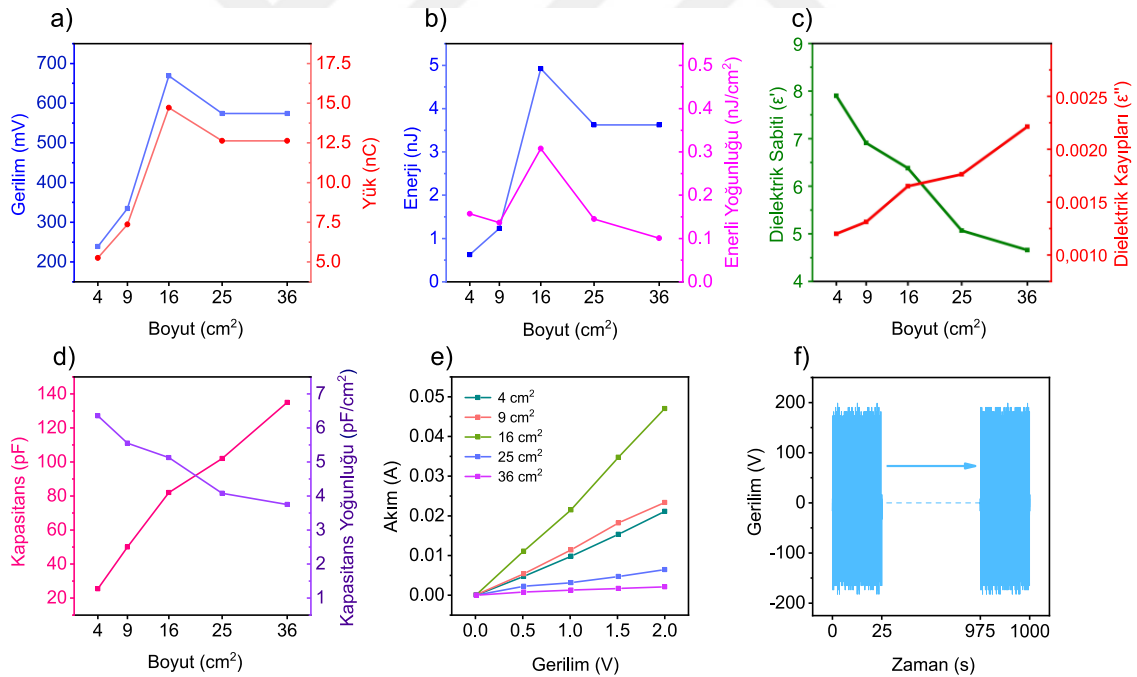
$$P_L = V^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan(\delta) \quad (4.12)$$

Kuadratik oran nedeniyle, bir malzemedeki dielektrik kayıpları öncelikle malzemenin maruz kaldığı voltajdan (V) etkilenmektedir. Uygulanan voltajın frekansı da önemli bir faktördür çünkü $\omega = 2\pi f$ olduğundan, dielektrik kayıplar doğrudan frekansla birlikte artmaktadır. Ayrıca, bir malzemenin kapasitansının artırılması, depolanan yükü artırarak daha yüksek dielektrik kayıplarına yol açmaktadır.

Sonuç olarak Eşitlik (4.5) ve (4.6), TENG'in yüzey alanının, çıkış voltajını doğrudan artırdığını göstermektedir. Ancak, Eşitlik (4.12) dielektrik kayıplarının, çıkış voltajının karesi ile üstel olarak arttığını ortaya koymaktadır. Artan dielektrik kayıplar, TENG'in çıkış performansının yüzey alanındaki bir artışla optimum bir değere kadar iyileştiği paradoksal bir duruma yol açmaktadır. Bu optimum değer ötesinde, yüzey alanındaki fazla artış, önemli ölçüde artan dielektrik kayıpları nedeniyle çıkış voltajında karşılık gelen bir artışla sonuçlanmayacaktır. Bu nedenle, dielektrik yüzey alanının optimize edilmesi TENG'lerin enerji yoğunluğunu artırmak için büyük önem arz etmektedir.

Yük empedansı, TENG'lerin çıkış gücünü etkileyen kritik bir faktör olarak kabul edilmektedir. Önceki deneylerde, TENG'lerin performans değerlendirmelerinde genellikle omik yükler kullanılmıştır. Ancak, TENG'in elektriksel çıktı performansını daha kapsamlı bir şekilde anlamak için hem kapasitif hem de omik yüklerle test edilmesi önemlidir. TENG'lerin sabit güç kaynağı olarak kullanılacakları uygulamalarda performanslarını test etmek için omik yükler kullanılırken, şarj cihazı olarak kullanılacağı uygulamalar için ise kapasitif yükler tercih edilmektedir. Bu yöntem, TENG'lerin farklı uygulama alanlarındaki etkinliğini belirlemeye olanak tanımaktadır.

Şekil 4.5(a), 2 Hz ve 100 N darbe altında, 22 nF kapasitif yük ile çalıştırılan farklı boyutlardaki TENG'lerin, maksimum voltaj değerlerini ve toplam transfer yükünü göstermektedir. Kapasitif yük altında üretilen maksimum gerilimler sırasıyla 238 mV, 334 mV, 669 mV, 574 mV ve 574 mV'dir. Eşitlik (3.3) kullanılarak, kapasitörde depolanan toplam yük sırasıyla 5,26 nC, 7,36 nC, 14,72 nC, 12,63 nC ve 12,63 nC' olarak bulunmuştur. Omik yükte boyut arttıkça gerilim artarken, kapasitif yükte 16 cm²'den sonra gerilim azalmıştır. Bu düşüş, TENG'lerin dielektrik kayıplarındaki artıştan ve birim alan başına enerji depolamadaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.5(b), TENG'lerde depolanan enerjiyi ve birim alan başına enerji yoğunluğunu göstermektedir. Elde edilen enerji Eşitlik (3.4) kullanılarak sırasıyla 0,63 nJ, 1,23 nJ, 4,92 nJ, 3,62 nJ ve 3,62 nJ olarak hesaplanmıştır. Enerji yoğunlukları ise sırasıyla 0,16 nJ/cm², 0,14 nJ/cm², 0,31 nJ/cm², 0,14 nJ/cm² ve 0,10 nJ/cm² olarak elde edilmiştir. Hem enerji hem de enerji yoğunluğu için maksimum değerler 16 cm² yüzey alanına sahip TENG'de elde edilmiştir.



Şekil 4. 5. Farklı boyutlardaki TENG'ler için: a) maksimum voltaj-yük eğrileri, b) enerji ve enerji yoğunluğu eğrileri, c) dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü eğrileri, d) kapasitans ve kapasitans yoğunluğu eğrileri, e) I-V karakteristikleri; f) 16 cm² TENG için yüksek-frekans ve düşük-kuvvet yorulma testi sonuçları

Malzemelerin dielektrik özellikleri, TENG'lerin performansını, verimliliğini ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 4.5(c), 200 kHz ve 2 V altında

TENG'lerin dielektrik sabitini (ϵ') ve dielektrik kayıplarını (ϵ'') göstermektedir. TENG'lerin boyutu arttıkça, dielektrik kayıpları artarken dielektrik sabitlerinin azalma eğiliminde olduğu göze çarpan bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Daha büyük TENG'ler daha fazla enerji depolayarak çıkış gücünü artırmaktadır. Bununla birlikte, artan TENG boyutları dielektrik kayıplarında ve kaçak akımlarda artışa neden olmaktadır. Artan dielektrik kayıpları ve kaçak akımlar, TENG'lerin enerji verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkileşim, enerji yoğunluğunun ideal bir TENG boyutunda en yüksek seviyeye ulaşmasına ve bunun ötesinde azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.5(d), TENG'lerin kapasitans değerlerini ve birim alan başına kapasitans yoğunluğunu göstermektedir. TENG'lerin kapasitans değerleri, sırasıyla 25,43 pF, 50 pF, 82,07 pF, 102 pF ve 135 pF olarak ölçülmüştür. Buna karşılık gelen kapasitans yoğunlukları ise sırasıyla 6,36 pF/cm², 5,56 pF/cm², 5,13 pF/cm², 4,08 pF/cm² ve 3,75 pF/cm² olmuştur. Kapasitans değeri, TENG'lerin boyutu ile orantılı olarak artarken, kapasitans yoğunluğu azalmaktadır. Kapasitans yoğunluğundaki azalma, TENG'lerden elde edilen enerji yoğunluğunun azalmasıyla sonuçlanmıştır. Boyuta ek olarak, eşdeğer DC direnci (R_{DC})' de TENG'lerin çıkış performansını etkilemektedir. TENG'lerin I-V karakteristiği analiz edilmiş ve Şekil 4.5(e)'de gösterildiği gibi, en yüksek ve en düşük akım sırasıyla 16 cm² ve 36 cm² TENG'ler tarafından üretilmiştir. Ohm yasası kullanılarak, 16 cm² TENG'in en düşük R_{DC} 'ye sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, R_{DC} 'nin enerji yoğunluğunu etkileyen önemli bir faktör olduğunu ve daha düşük R_{DC} 'ye sahip TENG'lerin daha yüksek enerji yoğunluğu elde edebileceğini göstermiştir.

Dikey temas modunda, beyaz silikon ve cam elyaftan yapılan TENG'lerin bir diğer avantajı da uzun ömürlü olmalarıdır. Şekil 4.5(f)'de gösterildiği gibi, 16 cm² boyutundaki TENG üzerinde, 4 Hz frekans ve 20 N mekanik kuvvet altında bir yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinde kullanılan düşük kuvvet nedeniyle, TENG'in çıkış voltajı önceki sonuçlardan daha düşüktür. Ancak, uzun test süresine rağmen, TENG voltaj genliği azalmamıştır. Bu sonuçlar, cam elyaf ve silikondan yapılmış TENG'lerin, uzun ömürlü kullanım için uygun, yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip ve kolayca üretilebilir olduklarını göstermektedir.

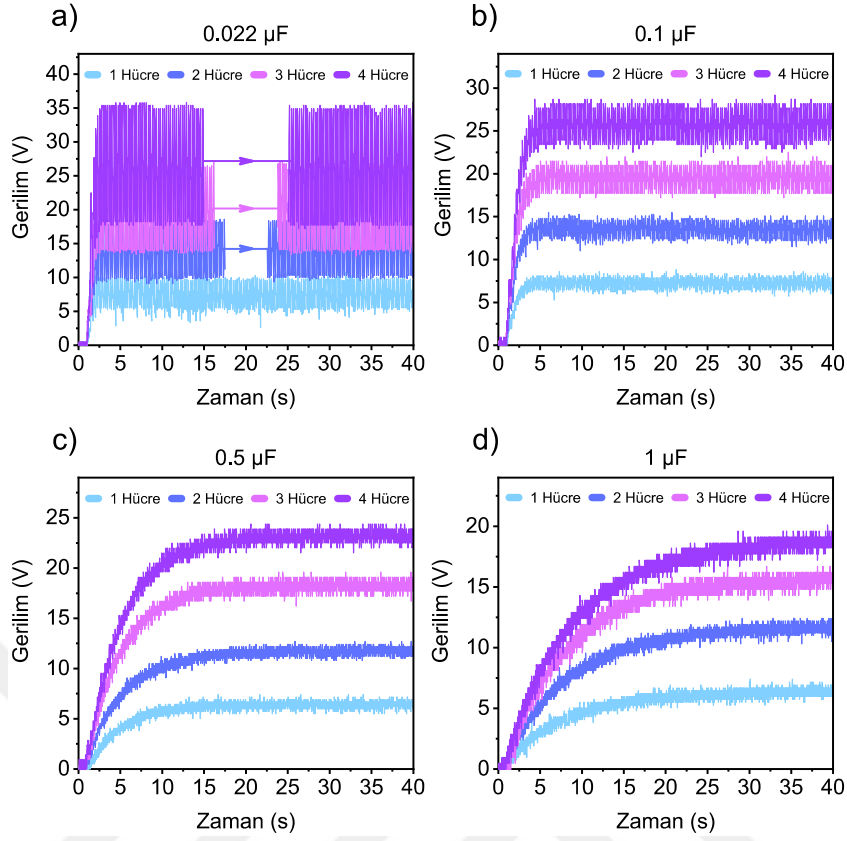
4.3. Çok Hücreli TENG'ler

Bu çalışmada elde edilen dielektrik boyutu optimizasyon sonuçları, optimum değerden daha büyük bir yüzey alanına sahip TENG'lerin, enerji yoğunluğunda bir düşüş yaşadığını göstermektedir. Bu nedenle, yüksek enerji yoğunluğuna sahip büyük ölçekli TENG'ler için daha küçük dielektriklere sahip, çok hücreli TENG'ler geliştirilmelidir.

Büyük ölçekli çok hücreli TENG'ler üretmek için daha küçük hücreler paralel olarak entegre edilebilir. Karmaşık, kararsız ve doğrusal olmayan voltaj üretme özelliği nedeniyle, TENG'lerin paralel bağlanmasıyla elde edilen eşdeğer çıkış voltajı, geleneksel elektrik güç kaynaklarından farklı olabilir. Paralel bağlanan gerilim kaynaklarında eşdeğer çıkış gerilimi, kaynakların ortalama değerini alır ve akım kapasitesi, kaynak sayısı ile orantılı olarak artar.

Hücrelerin paralel entegrasyonunun çıkış gerilimi üzerindeki etkisini analiz etmek için yatay ve dikey çok hücreli TENG'ler üretilmiştir. Farklı konfigürasyonlara sahip çok hücreli yapıların enerji dönüşüm verimliliği sonuçları, büyük ölçekli TENG'lerin tasarımına yol gösterecektir.

Şekil 4.6, çeşitli kapasitif yükler altında, 16 cm^2 yüzey alanlı hücrelerden oluşan dikey-çok hücreli TENG'in farklı hücre sayılarındaki çıkış gerilimlerini göstermektedir. Bir mekanik darbe makinesi ile dikey-çok hücreli TENG'e 4 Hz frekansında 20 N kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 4. 6. Dikey-çok hücreli TENG'in: a) 0,022 μF , b) 0,1 μF , c) 0,5 μF ve d) 1 μF kapasitif yük altında, farklı hücre sayılarındaki çıkış gerilimleri

Şekil 4.6(a), 0,022 μF kapasitif yük altında dikey-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 1, 2, 3 ve 4 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık olarak 10 V, 18 V, 27 V ve 36 V olmuştur. Veriler, TENG'lerin çıkış voltajı ile hücre sayısı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca, üretilen voltaj yükseldikçe dalga formundaki salınımın arttığı gözlemlenmiştir. Bu, kapasitans gerilimi yükseldikçe artan deşarj oranına bağlanabilir.

Şekil 4.6(b), 0,1 μF kapasitif yük altında dikey-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 1, 2, 3 ve 4 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık olarak 8 V, 15 V, 22 V ve 28 V'tur. 0,022 μF yük ile karşılaştırıldığında, 0,1 μF yükte şarj-deşarj salınımı azalmıştır. Çıkış voltajı ile hücre sayısı arasında orantılı bir artış olduğu sonucuna varılabilir.

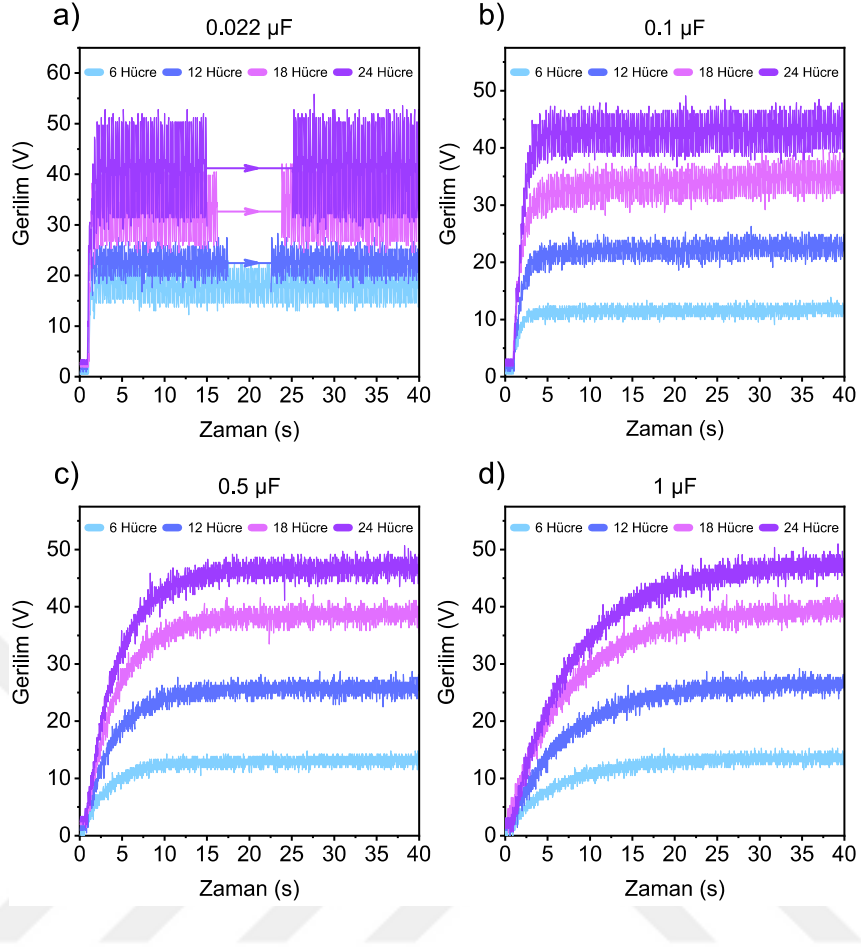
Şekil 4.6(c), 0,5 μF kapasitif yük altında dikey-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 1, 2, 3 ve 4 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık olarak 7 V, 13 V, 19 V ve 25 V'tur. Hücre sayısına bağlı olarak çıkış gerilimindeki doğrusal artış 0,5 μF yükte de devam etmektedir.

Son olarak, Şekil 4.6(d) 1 μF kapasitif yük altında dikey-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 1, 2, 3 ve 4 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık olarak 7,5 V, 12,5 V, 17,5 V ve 20 V'tur. Hücre sayısı arttıkça çıkış gerilimindeki artış oranı azalmaktadır. Önceki yüklerde çıkış voltajı ile hücre sayısı arasında gözlemlenen doğrusal ilişki 1 μF yükte bozulmaktadır. Bu sonuç, yük empedansı ile TENG çıkış voltajı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiye bağlanmaktadır.

Şekil 4.7, çeşitli kapasitif yükler altında, 16 cm^2 yüzey alanlı hücrelerden oluşan yatay-çok hücreli TENG'in farklı hücre sayılarındaki çıkış gerilimlerini göstermektedir. Yatay-çok hücreli TENG, altı adet paralel bağlı hücreden oluşan dört ayrı gruba ayrılmıştır. Bir mekanik darbe makinesi ile yatay-çok hücreli TENG'e 4 Hz frekansında 20 N kuvvet uygulanmıştır.

Şekil 4.7(a), 0,022 μF kapasitif yük altında yatay-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 6, 12, 18 ve 24 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık 23 V, 28 V, 40 V ve 53 V'tur. Çıkış voltajının hücre sayısındaki artışla sınırlı bir şekilde arttığı ve bu artışın doğrusal olmadığı açıkça görülmektedir. Bu davranış, darbe kuvvetinin hücreler üzerindeki asenkron dağılımından dolayı bazı hücrelerin düşük voltaj üretmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.7(b), 0,1 μF kapasitif yük altında yatay-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 6, 12, 18 ve 24 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık 13 V, 25 V, 40 V ve 49 V'tur.

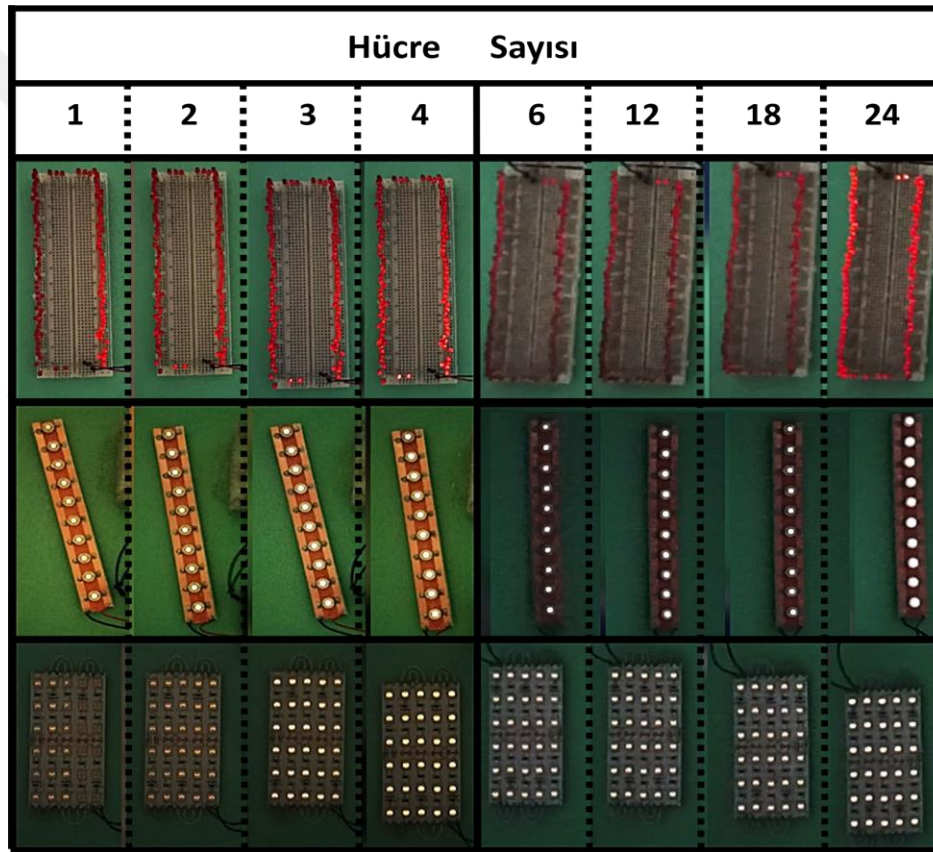


Şekil 4. 7. Yatay-çok hücreli TENG'in: a) 0,022 μF , b) 0,1 μF , c) 0,5 μF ve d) 1 μF kapasitif yük altında, farklı hücre sayılarındaki çıkış gerilimleri

Şekil 4.7(c), 0,5 μF kapasitif yük altında yatay-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 6, 12, 18 ve 24 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık olarak 14 V, 28 V, 42 V ve 51 V'tur. Kapasitans yükü 0,1 μF 'ye kıyasla 0,5 μF 'ye yükselmesine rağmen, üretilen maksimum voltajın önemli ölçüde değişmediği, ancak şarj süresinin arttığı görülmektedir.

Son olarak, Şekil 4.7(d) 1 μF kapasitif yük altında yatay-çok hücreli TENG'in çıkış gerilimlerini göstermektedir. 6, 12, 18 ve 24 hücreli TENG'ler tarafından üretilen maksimum gerilimler sırasıyla yaklaşık 14 V, 29 V, 42 V ve 52 V'tur. 1 μF kapasitif yükte, şarj süresinin önceki yüklere kıyasla azaldığı, ancak maksimum çıkış voltajlarının benzer kaldığı gözlemlenebilmektedir.

Dikey ve yatay çok hücreli TENG'lerin güç üretim performansları, aydınlatma uygulamaları ile karşılaştırılabilir. Üç farklı LED aydınlatma uygulamasından elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de sunulmuştur. İlk grup 100 adet 5 mm kırmızı LED'den, ikinci grup 3 V ve 1 W değerinde 10 adet LED'den ve üçüncü grup 12 V değerinde 30 adet şerit LED'den oluşturulmuştur. İlk gruptaki LED'ler kapasitif empedans sergilerken, diğer iki gruptaki LED'ler omik empedans sergilemiştir. LED gruplarının toplam empedansları, birinci grup için $Z1 = 184,03 - j272,07 \text{ k}\Omega$, ikinci grup için $Z2 = 72,1 - j0,1 \Omega$ ve üçüncü grup için $Z3 = 64,4 - j0,0014 \text{ k}\Omega$ olarak ölçülmüştür. $Z2$ 'nin empedans genliğinin $Z1$ ve $Z3$ 'e kıyasla çok düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 8. TENG hücrelerinin sayısına bağlı olarak çeşitli LED'lerin aydınlatma seviyeleri

LED uygulamalarından elde edilen aydınlatma seviyeleri kıyaslandığında dikey-çok hücreli TENG'lerde ışık miktarının hücre sayısı ile arttığı gözlemlenebilir. Ancak 3 ve 4 hücreli TENG'lerden elde edilen ışık miktarları birbirine yakındır. Benzer şekilde yatay-çok hücreli TENG'lerde de LED gruplarının aydınlatması hücre sayısı ile artmaktadır. Genel olarak, 4 hücreli dikey TENG'ler 6 hücreli yatay TENG'lere göre daha iyi

aydınlatma performansı sergilemektedir. Bu sonucun iki ana nedeni vardır. İlk neden, dikey-çok hücreli TENG'lerin daha senkronize çalışmasıdır, bu da üretilen enerjide kümülatif bir artışa neden olmaktadır. Öte yandan, yatay-çok hücreli TENG'lerdeki hücrelerin asenkron çalışması, üretilen toplam enerjide bir azalmaya yol açmaktadır. İkinci neden ise dikey-çok hücreli TENG'lerin köprü diyottan sonra entegre edilmesi, buna karşın yatay-çok hücreli TENG alt gruplarındaki hücrelerin doğrudan temas halinde olmasıdır. Bu bulgu, dikey-çok hücreli TENG'lerde görüldüğü gibi, TENG'ler köprü diyot üzerine entegre edildiğinde hasat edilen enerji miktarının arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, dikey-çok hücreli TENG'lerin senkronize çalışmaları ve köprü diyottan sonra entegre edilmeleri nedeniyle gelişmiş enerji hasadı ve aydınlatma performansı sergilediklerini göstermektedir.

Kapasitif yük ve LED uygulamaları ile dikey ve yatay çok hücreli TENG'leri karşılaştıran bu çalışma, TENG'lerin dikey entegrasyonunun daha verimli olduğunu belirlemiştir. LED uygulamalarından elde edilen bir diğer önemli bulgu da yük empedansının enerji verimliliği üzerindeki etkisidir. Özellikle, ikinci grubun LED'lerinin eşdeğer empedansı diğer gruplardan önemli ölçüde daha düşüktü. İkinci grup için LED aydınlatma sonuçları incelendiğinde, ışık yoğunluğundaki artışın hücre sayısındaki artışa kıyasla sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sınırlama, düşük empedanslı yüklerin doygunluğa yaklaşmasına ve sağlanan güçteki bir artışın çıkış gücünü önemli ölçüde artırmamasına bağlanabilir. Bu bulgular, yüksek enerji verimliliği elde etmek için büyük ölçekli TENG tasarımlarında güç kaynağı ile yük arasındaki empedans eşleşmesinin önemini vurgulamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, TENG'lerin enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla dielektrik malzemelerin kalınlığı ve yüzey alanı gibi boyutsal parametreleri üzerinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Pozitif dielektrik olarak cam elyaf ve negatif dielektrik olarak beyaz silikon kullanılarak üretilen TENG'lerin elektrik güç çıkışları farklı dielektrik kalınlıkları ve yüzey alanları için incelenerek dielektrikler için ideal boyutlar belirlenmiştir. Daha sonra, boyutu optimize edilmiş dielektriklerin verimli bir şekilde entegre edilmesi için yatay ve dikey çok hücreli TENG konfigürasyonları incelenmiştir.

Çalışmanın ilk aşaması pozitif dielektrik malzeme olarak kullanılan cam elyaf için ideal kalınlığı belirlemek amacıyla üç farklı kalınlıkta (0,030 mm, 0,075 mm ve 0,150 mm) cam elyaflarla TENG'ler üretilerek yüklü-yüksüz koşullarda çeşitli elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. TENG'lerin kısa devre koşulundaki çıkış gerilimleri sırasıyla 87,7 V, 141 V ve 121 V olarak ölçülmüştür. Orta kalınlıkta cam elyaftan üretilen TENG'in çıkış gerilimi, ince ve kalın olanlara göre sırasıyla %66,6 ve %16,5 daha iyidir. Farklı büyüklüklerdeki omik yükler altında TENG'ler tarafından üretilen güçler ve güç yoğunlukları $38,2 \text{ M}\Omega$ eşdeğer direnç altında maksimum değere ulaşmış ve ince, orta ve kalın cam elyaflar için sırasıyla $1,77 \text{ mW}$ ($1,1 \text{ W/m}^2$), $3,10 \text{ mW}$ ($1,94 \text{ W/m}^2$) ve $2,15 \text{ mW}$ ($1,34 \text{ W/m}^2$) olarak belirlenmiştir. Orta kalınlıktaki cam elyaflı TENG, diğer tüm yük değerleri için de en yüksek çıkış gücünü sağlamıştır. Bu sonuçlar, dielektrik kalınlığının TENG'lerin çıkış gücünü artırmada önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, dielektrik malzemelerin yüzey alanı da TENG'lerin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda çalışmanın ikinci aşaması olarak, negatif dielektrik malzemesi olan silikon için beş farklı yüzey alanına (4 cm^2 , 9 cm^2 , 16 cm^2 , 25 cm^2 ve 36 cm^2) sahip tabakalar kullanılarak üretilen TENG'lerin yüklü-yüksüz koşullarda çeşitli elektriksel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. TENG'lerin kısa devre koşulundaki çıkış gerilimleri sırasıyla 68 V, 107 V, 170 V, 262 V ve 282 V olarak ölçülmüştür. Çıkış gerilimlerinin TENG'lerin boyutuyla birlikte artış gösterdiği gözlemlenmiştir. TENG'ler tarafından üretilen akım değerleri ise sırasıyla $6,8 \mu\text{A}$, $10,7 \mu\text{A}$, $17 \mu\text{A}$, $26,2 \mu\text{A}$ ve $28,2 \mu\text{A}$ 'e karşılık gelmektedir. Bu akım, gerilim değerlerine bağlı olarak üretilen güçler $0,46$

mW, 1,14 mW, 2,89 mW, 6,86 mW ve 7,95 mW olarak hesaplanmıştır. Büyük TENG'lerdeki güç artışı, akım ve gerilim değerleriyle orantılı olarak artış göstermiştir.

Üretilen TENG'lerin elektriksel çıktı performansını daha kapsamlı bir şekilde anlamak için 22 nF kapasitif yük altında çıkış gerilimleri ölçülmüştür. Üretilen maksimum gerilimler farklı boyutlardaki TENG'ler için sırasıyla 238 mV, 334 mV, 669 mV, 574 mV ve 574 mV olarak belirlenmiştir. Kapasitif yükte 16 cm²'den sonra gerilimin düştüğü görülmektedir. Bu düşüş, TENG'lerin dielektrik kayıplarındaki artıştan ve birim alan başına enerji depolamadaki azalmadan kaynaklanmaktadır. TENG'lerde depolanan enerji ve birim alan başına enerji yoğunluğu 0,63 nJ (0,16 nJ/cm²), 1,23 nJ (0,14 nJ/cm²), 4,92 nJ (0,31 nJ/cm²), 3,62 nJ (0,14 nJ/cm²) ve 3,62 nJ (0,10 nJ/cm²) olarak elde edilmiştir. Hem enerji hem de enerji yoğunluğu için maksimum değerlerin 16 cm² yüzey alanına sahip TENG'de olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, optimum değerden daha büyük bir yüzey alanına sahip TENG'lerin, enerji yoğunluğunda bir düşüş yaşadığını göstermektedir. Bu nedenle, yüksek enerji yoğunluğuna sahip büyük ölçekli TENG'ler için daha küçük dielektriklere sahip, çok hücreli TENG'ler geliştirilmelidir.

Çalışmanın son aşamasında, optimize edilen dielektrik boyutları kullanılarak yatay ve dikey çok hücreli TENG konfigürasyonları incelenmiştir. Bu amaçla, 16 cm² yüzey alanına sahip dielektrikler ile, dikey doğrultuda dört hücreli ve yatay doğrultuda yirmi dört hücreli olmak üzere iki farklı çok hücreli TENG üretilmiştir. Dikey ve yatay çok hücreli TENG'lerin güç üretim performansları, çeşitli kapasitif yük ve aydınlatma uygulamaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, dikey konfigürasyonlu TENG'in yatay konfigürasyonlu TENG'e kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. Bunun temel nedeni, dikey-çok hücreli TENG'lerin daha senkronize çalışması olup, bu da üretilen enerjide kümülatif bir artışa yol açmaktadır. Öte yandan, yatay-çok hücreli TENG'lerdeki hücrelerin asenkron çalışması, üretilen toplam enerjide bir azalmaya neden olmaktadır. Bulgular, boyutları optimize edilmiş dielektrikler ile üretilen dikey-çok hücreli TENG konfigürasyonlarının, elektronik cihazlar için verimli ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Statistical Review of World Energy. (n.d.). Energy Institute. Retrieved from <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [2] Ippili S, Jella V, Thomas A, Yoon S. The Recent Progress on Halide Perovskite-Based Self-Powered Sensors Enabled by Piezoelectric and Triboelectric Effects. *Nanoenergy Adv.* 2021, 1, 3–31. 2021.
- [3] Zhu J, Zhu M, Shi Q, Wen F, Liu L, Dong B, Haroun A, Yang Y, Vachon P, Guo X, He T, Lee C. Progress in TENG Technology—A Journey from Energy Harvesting to Nanoenergy and Nanosystem. *EcoMat* 2020; 2(4).
- [4] Adhikari A, Sengupta J. Nanogenerators: A New Paradigm in Blue Energy Harvesting. *Nano Tools and Devices for Enhanced Renewable Energy 2021*: 171–193.
- [5] Zhang R, Olin H. Material Choices for Triboelectric Nanogenerators: A Critical Review. *EcoMat* 2020; 2(4): e12062.
- [6] Zhao Z, Zhou L, Li S, Liu D, Li Y, Gao Y, Liu Y, Dai Y, Wang J, Wang ZL. Selection Rules of Triboelectric Materials for Direct-Current Triboelectric Nanogenerator. *Nature Communications* 2021 12:1 2021; 12(1): 1–8.
- [7] Cheng T, Gao Q, Wang ZL. The Current Development and Future Outlook of Triboelectric Nanogenerators: A Survey of Literature. *Adv Mater Technol* 2019; 4(3): 1800588.
- [8] Niu S, Wang ZL. Theoretical Systems of Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy* 2015; 14: 161–192.
- [9] Zhang R, Olin H. Material Choices for Triboelectric Nanogenerators: A Critical Review. *EcoMat* 2020; 2(4): e12062.
- [10] Shao J, Willatzen M, Wang ZL. Theoretical Modeling of Triboelectric Nanogenerators (TENGs). *J Appl Phys* 2020; 128(11): 111101.
- [11] Niu S, Liu Y, Wang S, Lin L, Sheng Zhou Y, Hu Y, Lin Wang Z, Niu S, Liu Y, Wang S, Lin L, Zhou YS, Hu Y, Wang ZL. Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Materials* 2013; 25(43): 6184–6193.

- [12] Dharmasena RDIG, Silva SRP. Towards Optimized Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy* 2019; 62: 530–549.
- [13] Panda PK, Singh D, Köhler MH, De Vargas DD, Wang ZL, Ahuja R. Contact Electrification through Interfacial Charge Transfer: A Mechanistic Viewpoint on Solid–Liquid Interfaces. *Nanoscale Adv* 2022; 4(3): 884–893.
- [14] Shin E-C, Mun J-H, Baek S, Jung J, Kim Y-H. Recent Progress in Understanding the Microscopic Origin of Triboelectricity from Mechanochemistry to Thermoelectricity. *Chemical Physics Reviews* 2023; 4(3).
- [15] Lacks DJ, Shinbrot T. Long-Standing and Unresolved Issues in Triboelectric Charging. *Nature Reviews Chemistry* 2019 3:8 2019; 3(8): 465–476.
- [16] Stewart, K. (2024). Static Electricity. Erişim Tarihi: 20.06.2024. <https://www.britannica.com/science/static-electricity>
- [17] Liu J, Jiang T, Li X, Wang ZL. Triboelectric Filtering for Air Purification. *Nanotechnology* 2019; 30(29): 292001.
- [18] Das MK. Trends on Physics of Triboelectric Effect and Applications. Casa-Acharya.ComMK DASCasa-Acharya.Com n.d.
- [19] Wu C, Wang AC, Ding W, Guo H, Wang ZL. Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Adv Energy Mater* 2019; 9(1): 1802906.
- [20] Cao C, Li Z, Shen F, Zhang Q, Gong Y, Guo H, Peng Y, Wang ZL. Progress in Techniques for Improving the Output Performance of Triboelectric Nanogenerators. *Energy Environ Sci* 2024; 17(3): 885–924.
- [21] Wang ZL. On the First Principle Theory of Nanogenerators from Maxwell's Equations. *Nano Energy* 2020; 68: 104272.
- [22] Wang ZL. On Maxwell's Displacement Current for Energy and Sensors: The Origin of Nanogenerators. *Materials Today* 2017; 20(2): 74–82.
- [23] Wang ZL, Jiang T, Xu L. Toward the Blue Energy Dream by Triboelectric Nanogenerator Networks. *Nano Energy* 2017; 39: 9–23.
- [24] Shao J, Willatzen M, Jiang T, Tang W, Chen X, Wang J, Wang ZL. Quantifying the Power Output and Structural Figure-of-Merits of Triboelectric Nanogenerators in a Charging System Starting from the Maxwell's Displacement Current. *Nano Energy* 2019; 59: 380–389.

- [25] Shao J, Wang ZL. Displacement Current Theory of Triboelectric Nanogenerators. *Handbook of Triboelectric Nanogenerators 2023*: 1–64.
- [26] Fan FR, Tian ZQ, Lin Wang Z. Flexible Triboelectric Generator. *Nano Energy* 2012; 1(2): 328–334.
- [27] Wang ZL. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors. *ACS Nano* 2013; 7(11): 9533–9557.
- [28] Zhu G, Pan C, Guo W, Chen CY, Zhou Y, Yu R, Wang ZL. Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning. *Nano Lett* 2012; 12(9): 4960–4965.
- [29] Wang ZL. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology and Self-Powered Sensors – Principles, Problems and Perspectives. *Faraday Discuss* 2015; 176(0): 447–458.
- [30] Wang J, Zhou L, Zhang C, Wang ZL, Wang J, Zhou L, Zhang C, Wang ZL. *Small-Scale Energy Harvesting from Environment by Triboelectric Nanogenerators. A Guide to Small-Scale Energy Harvesting Techniques* 2019.
- [31] Yılmaz ND. Triboelektrik Nanogeneratörler İle Enerji Hasadı: Teorik Köken, Çalışma Prensipleri Ve Çalışma Modları. *Konya Journal of Engineering Sciences* 2021; 9(1): 232–249.
- [32] Zhu G, Pan C, Guo W, Chen CY, Zhou Y, Yu R, Wang ZL. Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning. *Nano Lett* 2012; 12(9): 4960–4965.
- [33] Wang S, Lin L, Wang ZL. Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics. *Nano Lett* 2012; 12(12): 6339–6346.
- [34] Zhang C, Wang ZL. *Triboelectric Nanogenerators*. 2018: 1335–1376.
- [35] Yang Y, Zhang H, Lin ZH, Zhou YS, Jing Q, Su Y, Yang J, Chen J, Hu C, Wang ZL. Human Skin Based Triboelectric Nanogenerators for Harvesting Biomechanical Energy and as Self-Powered Active Tactile Sensor System. *ACS Nano* 2013; 7(10): 9213–9222.

- [36] Niu S, Liu Y, Wang S, Lin L, Zhou YS, Hu Y, Wang ZL. Theoretical Investigation and Structural Optimization of Single-electrode Triboelectric Nanogenerators. Wiley Online Library S Niu, Y Liu, S Wang, L Lin, YS Zhou, Y Hu, ZL Wang *Advanced Functional Materials*, 2014; Wiley Online Library 2014; 24(22): 3332–3340.
- [37] Zhang H, Yang Y, Zhong X, Su Y, Zhou Y, Hu C, Wang ZL. Single-Electrode-Based Rotating Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Energy from Tires. *ACS Nano* 2014; 8(1): 680–689.
- [38] Yang Y, Zhou YS, Zhang H, Liu Y, Lee S, Wang ZL. A Single-Electrode Based Triboelectric Nanogenerator as Self-Powered Tracking System. *Advanced Materials* 2013; 25(45): 6594–6601.
- [39] Wang S, Xie Y, Niu S, Lin L, Wang ZL. Freestanding Triboelectric-Layer-Based Nanogenerators for Harvesting Energy from a Moving Object or Human Motion in Contact and Non-Contact Modes. *Advanced Materials* 2014; 26(18): 2818–2824.
- [40] Wang ZL. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology and Self-Powered Sensors – Principles, Problems and Perspectives. *Faraday Discuss* 2015; 176(0): 447–458.
- [41] Panpho P, Charoonsuk T, Vittayakorn N, Bongkarn T, Sumang R. Flexible Hybrid Piezo/Triboelectric Energy Harvester Based on a Lead-Free BNT-BT-KNN Ceramic-Polymer Composite Film. *Ceram Int* 2024.
- [42] Yao Y, Zhu W, Teng Y, Li C, Yang Y. Polymer-Based Fabrication of 2D Metallic and Ceramic Nanomaterials. *Acc Mater Res* 2024.
- [43] Topçu MA, Karabiber A, Koç F, Sarılmaz A, Özel F. Boron Minerals with Different Crystal Structures as Performance Manipulators in Triboelectric Nanogenerators. *Energy Technology* 2024; 12(4): 2301282.
- [44] Okbaz A, Karabiber A, Yar A, Kınas Z, Sarılmaz A, Özel F. High-Performance Triboelectric Nanogenerator with Optimized Al or Ti-Embedded Silicone Tribomaterial. *Energy Convers Manag* 2022; 252: 115053.
- [45] Topçu MA, Karabiber A, Sarılmaz A, Koç F, Özel F. Performance-Enhanced of Triboelectric Nanogenerator Based on Functionalized Silicone with Pumice for Energy Harvesting. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2023; 57: 103251.
- [46] Karabiber A, Dirik Ö, Koc F, Ozel F. Dielectric Size Optimization for High Power Density in Large-Scale Triboelectric Nanogenerators. *Nano Res* 2024.

- [47] Liu D, Zhou L, Cui S, Gao Y, Li S, Zhao Z, Yi Z, Zou H, Fan Y, Wang J, Wang ZL. Standardized Measurement of Dielectric Materials' Intrinsic Triboelectric Charge Density through the Suppression of Air Breakdown. *Nature Communications* 2022 13:1 2022; 13(1): 1–10.
- [48] Li Z, Liu J, Chi M, Miao X, Yang H, Cui W, Yu A, Zhai J. Ultra-High Output Triboelectric Nanogenerator Based on Synergies of Material Modification and Charge Pumping. *Chemical Engineering Journal* 2024; 481: 148726.
- [49] Zou Y, Xu J, Chen K, Chen J. Advances in Nanostructures for High-Performance Triboelectric Nanogenerators. *Adv Mater Technol* 2021; 6(3): 2000916.
- [50] Dai K, Wang X, Niu S, Yi F, Yin Y, Chen L, Zhang Y, You Z. Simulation and Structure Optimization of Triboelectric Nanogenerators Considering the Effects of Parasitic Capacitance. *Nano Res* 2017; 10(1): 157–171.
- [51] El-Mohandes AM, Zheng R. Active Matching Circuit to Enhance the Generated Power of Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy* 2021; 80: 105588.
- [52] Yin P, Tang L, Li Z, Guo H, Aw KC. Circuit Representation, Experiment and Analysis of Parallel-Cell Triboelectric Nanogenerator. *Energy Convers Manag* 2023; 278: 116741.
- [53] Yin P, Aw KC, Jiang X, Xin C, Guo H, Tang L, Peng Y, Li Z. Fish Gills Inspired Parallel-Cell Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy* 2022; 95: 106976.
- [54] Zhao D, Yu X, Wang Z, Wang J, Li X, Wang ZL, Cheng T. Universal Equivalent Circuit Model and Verification of Current Source for Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy* 2021; 89: 106335.
- [55] Arkan E, Karabiber A, Topçu MA, Kinas Z, Sarilmaz A, Ozel SS, Ozel F. Nano-Ceria Based TENGs: Effect of Dopant Structure on Energy Harvesting Performance. *Surfaces and Interfaces* 2023; 37: 102683.
- [56] Wang J, Zhang B, Zhao Z, Gao Y, Liu D, Liu X, Yang P, Guo Z, Wang ZL, Wang J. Boosting the Charge Density of Triboelectric Nanogenerator by Suppressing Air Breakdown and Dielectric Charge Leakage. *Adv Energy Mater* 2024; 14(8): 2303874.