



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ZnO İNCE FİLMLERİNİN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE
TRİBOELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Cansu KARAGÖZ

**Danışman
Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK**

**RİZE
2023**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK danışmanlığında, Cansu KARAGÖZ tarafından hazırlanan *ZnO İnce Filmlerinin Yapısal, Elektriksel ve Triboelektrik Özelliklerinin İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 17/05/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK	
Üye	: Prof. Dr. Murat TOMAKİN	
Üye	: Prof. Dr. Şükrü ÇELİK	

ETİK BEYAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “ZnO İnce Filmlerinin Yapısal, Elektriksel ve Triboelektrik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

17/05/2023

Cansu KARAGÖZ

ÖN SÖZ

Hazırlanan “ZnO İnce Filmlerinin Yapısal, Elektriksel ve Triboelektrik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı çalışmada triboelektrik etki prensibi ile çalışan triboelektrik nanogeneratör (TENJ) üretilmiştir. TENJ yapısında elektrot olarak kullanılmak üzere yarıiletken özellikli ZnO ince filmleri seçilmiştir. Manyetik alanda sıçratma sistemi ile üretilen ZnO ince filmler silisyum (Si) alttaş üzerine büyütülmüştür. ZnO ince filmler TENJ içinde bakır (Cu) ve ITO-PET elektrotla birlikte yer almıştır. Üretilen triboelektrik katmanın özelliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bana destek olan, hiçbir zaman yardımını eksik etmeyen çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK ve değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Gizem DURAK YÜZÜAK’a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca değerli arkadaşlarım Seray ÖZKAN’a, Mehmet ÇETİN’e verdikleri destek için teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca ilgi ve desteklerini esirgemeyen sevgili babam Yaşar KARAGÖZ, annem Neşe KARAGÖZ ve ablalarım Melek KARAGÖZ, Hatice TUZCU ve Esra NAR’a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M972 proje numarası ile desteklenmiştir.

Cansu KARAGÖZ

2023\Rize

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
ŞEKİLLER LİSTESİ	XII
GİRİŞ	1
1. TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER.....	3
1.1. Paralel Plakalı Kapasitör Modeli TENJ	5
1.1.1. Temas Modu TENJ'ler	6
1.1.2. Kayma Modu TENJ'ler	8
1.1.3. Tek Elektrotlu Mod TENJ'ler	10
1.1.4. Serbest Triboelektrik Tabaka Modu	11
1.2. Mesafeye Bağlı Elektrik Alanı (DDEF) Modeli TENJ'ler	12
1.3. Triboelektrik Nanogeneratörler İçin FOM (Figure Of Merit)	14
1.4. TENJ'lerde Kullanılan Malzemeler	15
2. YARIİLETKEN MALZEMELER	20
2.1. Yarıiletkenlerde Katkılama İşlemi	21
2.2. Çinko Oksit Yarıiletkenlerin Özellikleri	23
3. İNCE FİLM ÜRETME TEKNİKLERİ	25
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	28
5. MATERYAL VE YÖNTEM	35
5.1. Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi ile İnce Film Üretimi	35
5.2. Yapısal Karakterizasyon	37
5.2.1. X-Işını Difraktometresi (XRD).....	37
5.2.2. X-Işını Reflektometresi (XRR).....	41

5.2.3.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	42
5.2.4.	Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	43
5.3.	Elektriksel Ölçüm.....	45
5.4.	Isıl İşlem.....	47
5.5.	Triboelektrik Ölçüm.....	48
6.	BULGULAR	52
6.1.	Hedef ve Altaşın Özellikleri	52
6.2.	Isıl İşlem Öncesi ZnO İnce Filmlerin Özellikleri	57
6.2.1.	ZnO İnce Filmlerin X- Işını Kırınım Sonuçları	57
6.2.2.	ZnO İnce Filmlerin X-Işını Reflektometresi Sonuçları	60
6.2.3.	ZnO İnce Filmlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları	61
6.2.4.	ZnO İnce Filmlerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları ...	64
6.2.5.	ZnO İnce Filmin Elektriksel Sonuçları	66
6.3.	Isıl İşlem Sonrası ZnO İnce Filmlerin Özellikleri.....	72
6.3.1.	Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Sonuçları .	72
6.3.2.	Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları	73
6.3.3.	Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları	75
6.3.4.	Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin Elektriksel Sonuçları	77
6.4.	Bakır (Cu) İnce Film Elektrot	79
6.5.	İndiyum Kalay Oksit (ITO) - Polietilen Tereftalat (PET) Katman	82
6.6.	Triboelektrik Ölçüm Sonuçları	83
6.6.1.	Akım-Gerilim Ölçümleri	83
6.6.2.	Elektriksel Yük Ölçümleri	91
7.	SONUÇ.....	95
	KAYNAKÇA.....	100

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK

Hazırlayan : Cansu KARAGÖZ

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 107

ÖZET

**ZnO İNCE FİMLERİN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE TRIBOELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Teknolojinin gelişmesi yaşam kalitesini iyileşmesinin yanı sıra enerjiye olan talebi de arttırmaktadır. Bilim insanları, enerji ihtiyacının karşılanması için günümüzde kullanılan kaynakların dışında, atık enerji problemi ve verimlilik gibi sorunlara çözüm olabilecek yeni elektrik enerji üretim mekanizmaları arayışındadırlar. Bu yeni elektrik enerjisi üretim mekanizmalarından biri de 2012 yılında geliştirilen triboelektrik nanogeneratörlerdir (TENJ). TENJ yapısında genellikle polimer yüzeyler kullanılmaktadır. Polimer yapının üretiminin kolay olmasına karşılık kısa sürede deforme olmasıyla istenilen performans sağlanamamaktadır. Bunun için polimerlere alternatif olarak daha hızlı elektron kaybetme özelliği bulunan yarıiletkenlerin kullanılmasının verimliliği arttıracığı düşünülmektedir.

Hazırlanan bu tez çalışması ile, triboelektrik etki prensibi ile çalışan çinko oksit (ZnO) yarıiletken tabanlı TENJ üretilmiştir. ZnO ince filmler; 40-100 W sıçratma güçlerinde, 5-15 mTorr sıçratma basınçlarında, %5-15 kısmi O₂ basınçlarında ve 5-100 nm kalınlıklarında Si(100) alttaş üzerinde üretilmiştir. Manyetik alanda sıçratma sistemi ile üretilen ZnO ince filmlerin vakum altında ısıtılma işlemlere maruz bırakılarak; X-ışını difraktometresi (XRD), X-ışını reflektometresi (XRR), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskopu (AFM) ile yüzey morfolojik özellikleri belirlenirken direnç ölçüm sistemi ile elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Triboelektrik özellikleri, laboratuvarında tasarlanıp üretilen doğrusal bir reciprokan hareket sağlayıcı ile mekanik enerji simüle edilerek elde edilmiş ve TENJ'in elektriksel çıktıları incelenmiştir. Üretilen ince filmlerin XRD desenleri ve SEM görüntüleri incelendiğinde yapının istenildiği gibi wurtzite ve homojen olduğu görülmüştür. Elektriksel ölçümleri yapılan filmler arasında en iyi sonuç 100 nm kalınlıktaki ince filmde elde edilmiştir ve 100 nm kalınlığında elde edilen ince filmler ısıtılma işlemi tabii tutulmuştur. TENJ'de elektrot olarak bakır (Cu) ve indiyum kalay oksit (ITO) kaplı polietilen tereftalat (PET) kullanılmıştır. Isıl işlem sıcaklığı artmasıyla verimlilik artmıştır. Elde edilen veriler literatür ile karşılaştırılmıştır ve uyumlu olduğu görülmüştür. Tasarlanan TENJ'lerden en yüksek ~70 V gerilim ve ~5,36 µA akım değeri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ZnO, TENJ, Yarıiletken.

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Energy Systems Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Ercüment YÜZÜAK

Author : Cansu KARAGÖZ

Year : 2023

Pages : 107

ABSTRACT

INVESTIGATION OF STRUCTURAL, ELECTRICAL AND TRIBOELECTRIC PROPERTIES OF ZnO THIN FILMS

Technology advancements that enhance people's standard of living also lead to a rise in the need for energy. New electrical energy production mechanisms that address issues like waste energy and efficiency are being investigated by scientists as a means of meeting energy demands beyond the conventional methods and materials now in use. Triboelectric nanogenerators (TENG) are one example of a novel type of electrical energy generation mechanism that was invented in 2012. Most commonly, the electrodes in a TENG are polymer surfaces. Although the polymer structure can be easily manufactured, it cannot operate as expected because of its rapid deformation. It is believed that replacing polymers with semiconductors, which lose electrons more quickly, will improve efficiency in this regard. The present thesis resulted in the development of a zinc oxide (ZnO) semiconductor-based TENG that operates on the basis of the triboelectric effect.

It was produced as a ZnO thin films on Si(100) substrates with sputtering powers of 40-100 W, pressures of 5-15 mTorr, partial oxygen concentrations of 5-15%, and film thicknesses of 5-100 nm. Its structural properties were determined by X-ray diffractionmeter (XRD), X-ray reflectometer (XRR), scanning electron microscope (SEM), atomic force microscope (AFM), and surface morphological properties; electrical properties were determined by resistance measurement system; and the films were produced using a magnetic field sputtering system and then heated under vacuum. Conversely, TENG's electrical outputs were achieved by modelling mechanical energy with a linear reciprocating motion generator whose triboelectric characteristics were engineered and manufactured in the lab. The thin films XRD patterns and scanning electron microscope (SEM) showed the desired wurtzite structure and homogeneity. The 100 nm thin layer had the best electrical measuring results. Thin films with a thickness of 100 nm were heated in an oven. As the electrode, we used copper (Cu) and polyethylene terephthalate (PET) - indium tin oxide (ITO). Triboelectric measurements of the films were taken at room temperature and after heat treatment. The developed TENGs produced the highest voltage of ~70 V and the current value of ~5,36 μ A. The results obtained were found to be consistent with the existing literature.

Keywords: ZnO, TENG, Semiconductor.

KISALTMALAR

A	:	Alan
Å	:	Angstrom
AFM	:	Atomik kuvvet mikroskobu
Al	:	Alüminyum
Ar	:	Argon
Au	:	Altın
B	:	Bor
Br	:	Brom
BSD	:	Geri saçılan elektron detektörü
C	:	Kapasitans
°C	:	Santigrat derece
CdS	:	Kadmiyum sülfür
CITE	:	Poliüretan
Cu	:	Bakır
d	:	Kalınlık
D	:	Yer değiştirme alanı
DC	:	Doğru akım
DDEF	:	Mesafeye bağlı elektrik alan modeli
E	:	Elektrik alan
EDX	:	Enerji dağılımı X-ışını spektrumu
ε	:	Geçirgenlik
F	:	Flor
FBB	:	Fiziksel buhar biriktirme
FEP	:	Florlu etilen propilen
FOM	:	TENJ'lerin stardardizasyonu için etki değeri (figure of merit)
FOM _c	:	Cihaz FOM
FOM _m	:	Malzeme FOM
FOM _p	:	Performans FOM
Ga	:	Galyum

Ge	:	Germanyum
I	:	İyot
ITO	:	İndiyum kalay oksit
K	:	Kelvin
kg-f	:	Kilogram kuvvet
<i>l</i>	:	Uzunluk
m_b	:	Boşluk kütlesi
m_e	:	Elektron kütlesi
N	:	Newton
O	:	Oksijen
P	:	Polarizasyon alanı
$\bar{P}^*$	:	Ortalama boyutsuz güç
PDMS	:	Polidimetilsiloksan
PET	:	Polietilen tereftalat
PMMA	:	Polimetilmetakrilat
PS	:	Polistiren
Pt	:	Platin
PTFE	:	Politetrafloretilen
PU	:	Poliüretan
PVC	:	Polivinil klorür
PVDF	:	Polivinilidin florür
Q	:	Yük
R	:	Direnç
RF	:	Radyo frekansı
S	:	Temas alanı
SE	:	İkincil elektron detektörü
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
Si	:	Silisyum
TEE	:	Triboelektrik etki
TENJ	:	Triboelektrik nanojeneratör
V	:	Gerilim

$\bar{v}$	:	Ortalama hız
x	:	Ayırma mesafesi
$x_{\max}$	:	Maksimum yer değıştirme
XRD	:	X-ışını difraktometresi
XRR	:	X-ışını reflektometresi
Zn	:	Çinko
ZnO	:	Çinko oksit
λ	:	Dalga boyu
σ	:	Yük yoğunluğu



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Triboelektrik enerji üretimi için kullanılan malzemeler ve yüzey topografyaları.....	18
Tablo 2. ZnO wurtzite kristal sistemine ait birim hücre parametreleri	24
Tablo 3: Açısal frekans değerlerine göre sisteme uygulanacak kuvvetin hesabı.....	49
Tablo 4. Rietveld Analizi sonucunda elde edilen çinko ve oksijenin atom konumları	55
Tablo 5. Rietveld Analizi sonucunda elde edilen ZnO hedefin birim hücre parametreleri	56
Tablo 6. ZnO ince filmlerin özdirenç hesaplamaları	78
Tablo 7. TENJ cihazlarından elde edilen en yüksek yük değerleri.....	94
Tablo 8. ZnO ince filmin özellikleri	95
Tablo 9. ZnO ince filmlerin kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve güç değerleri	96
Tablo 10. Malzeme FOM'un hesaplama sonuçları.....	96
Tablo 11. TENJ'lerin çıkış gerilimi ve güç çıktılarının yıllara göre karşılaştırılması	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. TENJ katmanları; a) yük oluşturma katmanı, b) yük tutma katmanı, c) yük toplama katmanı ve d) yük depolama katmanı	3
Şekil 2. TENJ temel modları ve bazı kullanım alanları; a) temas modu, b) kayma modu, c) tek elektrot mod, d) serbest triboelektrik tabaka modu	4
Şekil 3. TENJ; a) dielektrik-dielektrik temas mod, b) iletken-dielektrik temas mod .	6
Şekil 4. Temas modu TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibi; a) ilk durum, b) temas, c) ayrılma, d) serbest bırakma, e) temas hali	7
Şekil 5. TENJ; a) dielektrik-dielektrik kayar mod, b) iletken-dielektrik kayar mod ..	9
Şekil 6. Kayma mod TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibi	10
Şekil 7. Tek elektrot mod TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibi	11
Şekil 8. Serbest triboelektrik tabaka modu TENJ çalışma prensibi	12
Şekil 9. TENJ yüzeyleri; a) düzlemsel, b) dışbükey ve c) içbükey.....	13
Şekil 10. Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilen triboelektrik seri	16
Şekil 11. Zhang ve Olin'in yaptıkları çalışma sonucu TENJ'lerde; a) elektron alıcı, b) elektron verici olarak kullanılan malzemeler.....	17
Şekil 12. Enerji band diyagramı; a) iletken, b) yarıiletken, c) yalıtkan	20
Şekil 13. Yarıiletkenler; a) n-tipi germanyum, b) p-tipi germanyum	21
Şekil 14. p-n eklem.....	22
Şekil 15. ZnO'nun; a) B1 (kaya tuzu), b) B3 (çinko sülfür) ve c) B4 (wurtzite) kristal yapısı.....	23
Şekil 16. Elektromanyetik spektrum	24
Şekil 17. İnce film üretme teknikleri	25
Şekil 18. Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri.....	26
Şekil 19. Çekirdeklenme modelleri a) adacık büyümesi, b) katman büyümesi, c) adacık-katman büyümesi	26
Şekil 20. Sıçratma mekanizması.....	35
Şekil 21. Manyetik alanda sıçratma sistemi	36
Şekil 22. İnce film üretim mekanizması	37
Şekil 23. X-ışını kırımında gelen ve kırınımına uğramış ışınlar	38

Şekil 24. X-ışını reflektometre desenleri	41
Şekil 25. X-ışını difraktometresi	42
Şekil 26. Taramalı elektron mikroskobunun yapısı.....	42
Şekil 27. Taramalı elektron mikroskobu	43
Şekil 28. AFM çalışma mekanizması	44
Şekil 29. Atomik kuvvet mikroskobu.....	44
Şekil 30. Van der Pauw yöntemi	45
Şekil 31. Au/p-Si/ZnO/Au diyotların I-V ölçüm düzeneği	47
Şekil 32. Vakum atmosferinde ısıtma işlem sistemi	47
Şekil 33. Tez çalışmasında kullanılan dikey temas ayırma modunda çalışan TENJ'in çalışma mekanizması; a) temas, b) ayrılma, c) serbest bırakma, d) temas hali	48
Şekil 34. Triboelektrik ölçüm mekanizması.....	49
Şekil 35. TENJ'in çıkış akımını için ölçebilmek tasarlanan akım preamplifikatörü. 50	
Şekil 36. Akım-gerilim dönüştürücü amplifikatörün devre bağlantı şeması.....	51
Şekil 37. ZnO hedef.....	52
Şekil 38. ZnO hedefin farklı büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntüsü	52
Şekil 39. ZnO hedefin SEM kullanılarak elde edilen EDX analizi	54
Şekil 40. ZnO hedefin XRD kırınım deseni ve arıtım sonucu.....	55
Şekil 41. p-tipi Si(100) alttaşın XRD kırınım deseni	56
Şekil 42. Farklı sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni	58
Şekil 43. Farklı sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni	58
Şekil 44. Farklı kısmi O ₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni	59
Şekil 45. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni....	60
Şekil 46. ZnO ince filmin XRR deseni sonuçları	61
Şekil 47. ZnO ince filmlerin a) 5nm, b) 10 nm, c) 25 nm, d) 50 nm, e) 75 nm ve ..	62
Şekil 48. ZnO ince filmlerin parçacık boyutu analizi.....	64
Şekil 49. ZnO ince filmin AFM görüntüsü.....	65

Şekil 50. ZnO ince filmin 3 boyutlu AFM görüntüsü ve topografi-yüzey pürüzlülüğü grafiği.....	65
Şekil 51. Farklı sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği	66
Şekil 52. Farklı sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği	67
Şekil 53. Farklı sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği.....	68
Şekil 54. Farklı sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği.....	68
Şekil 55. Farklı kısmi O ₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği.....	69
Şekil 56. Farklı kısmi O ₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği.....	70
Şekil 57. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği.....	71
Şekil 58. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği....	71
Şekil 59. Isıl işlem uygulanan ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni	72
Şekil 60. ZnO ince filmlere a) 500 °C, b) 600 °C, c) 700 °C ısıtıl işlem uygulandıktan sonra alınan SEM görüntüleri	73
Şekil 61. Isıl işlem sonrası ZnO ince filmlerin parçacık boyutu analizi.....	75
Şekil 62. a) 500 °C, b) 600 °C, c) 700 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmlerin AFM görüntüsü	76
Şekil 63. a) 500 °C, b) 600 °C, c) 700 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmlerin 3 boyutlu AFM görüntüsü ve topografi-yüzey pürüzlülüğü grafikleri	77
Şekil 64. Farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmış ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği.....	78
Şekil 65. Farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmış ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği.....	79
Şekil 66. Bakır elektrotun XRD kırınım deseni.	80
Şekil 67. Bakır ince film elektrotun a) SEM görüntüsü, b) AFM görüntüsü.....	81
Şekil 68. Cu elektrot ince filmin XRR sonuçları.....	81

Şekil 69. ITO-PET X-ışını kırınım deseni.....	82
Şekil 70. ITO kaplı PET elektrotun a) SEM görüntüsü, b) AFM görüntüsü	83
Şekil 71. Farklı frekans aralığında oda sıcaklığında üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akım eğrisi	84
Şekil 72. Farklı frekans aralığında oda sıcaklığında üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi	85
Şekil 73. Farklı frekans aralığında 400 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akımı eğrisi...	86
Şekil 74. Farklı frekans aralığında 400 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi .	86
Şekil 75. Farklı frekans aralığında 500 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akımı eğrisi...	87
Şekil 76. Farklı frekans aralığında 500 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi .	88
Şekil 77. Farklı frekans aralığında 600 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akımı eğrisi...	89
Şekil 78. Farklı frekans aralığında 600 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi .	89
Şekil 79. Farklı frekans aralığında 700 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akım eğrisi....	90
Şekil 80. Farklı frekans aralığında 700 °C ısıtma işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi .	91
Şekil 81. Oda sıcaklığında üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi	92
Şekil 82. 400 °C ısıtma işlemi uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi	92
Şekil 83. 500 °C ısıtma işlemi uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi	93
Şekil 84. 600 °C ısıtma işlemi uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi	93

Şekil 85. 700 °C ısıt işleml uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağı yük eğrisi	94
Şekil 86. Tasarlanan TENJ cihazının literatür ile çıkış gerilimlerinin karşılaştırılması	98
Şekil 87. Tasarlanan TENJ cihazı kullanılarak yakılan LED ışıklar	98



GİRİŞ

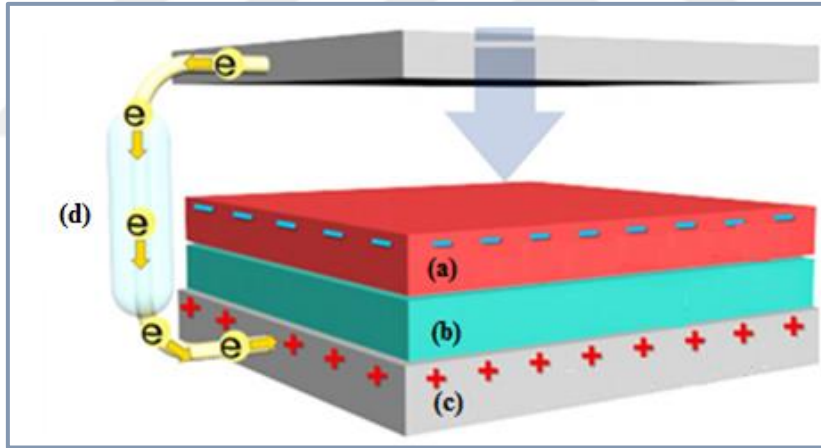
Dünyanın enerjiye olan ihtiyacı gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün artmaktadır. Bu durum bilim insanlarının geleneksel yöntemlerin dışında yeni enerji üretim mekanizmaları arayışlarında bulunmasına neden olmaktadır. Günümüzde enerji üretimi için nanoteknolojik cihazların kullanımı giderek yaygınlaşan yöntemlerden bir tanesidir. Fakat aygıtların küçülmesi enerji sorununu ortadan kaldırmadığı gibi sürekli güç üretimi de sağlamamaktadır. Bununla birlikte atık enerji problemi ve bunların verimliliği gibi enerji sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu doğrultuda sorunlara çözüm olabilecek farklı enerji türlerinden enerji üretebileceğimiz yeni yaklaşımlar gerekmektedir. Bu yaklaşımlardan biri de triboelektrik etki kullanılarak nanoteknolojik cihazlardan enerji üretimidir (Evans, 2011). Triboelektrik etki (TEE) malzemelerin sürtünme ile elektriksel olarak yüklenmesi olarak tanımlanır. TEE ile sürtünme sonucu meydana gelen mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek, günümüz teknolojisinde kullanımı yaygınlaşan nano boyuttaki cihazlara güç sağlanabilmektedir. Bu tür mekanizmalar triboelektrik nanogeneratör (TENJ) olarak adlandırılmaktadır. TENJ birbirinden farklı triboelektrik karakteristik gösteren iki malzemeden oluşan aygıtlardır. İki malzeme temas ettiğinde sürtünme ile birlikte mekanik deformasyon meydana gelir. Nano boyuttaki yüzey pürüzlülüğünün de etkisi ile malzeme yüzeyinde eşit miktarda zıt işaretli yükler üretilmektedir. TENJ çalışma yapısı gereği iki yüzey temas ayrılma hareketi yaptığından malzeme üzerindeki yükler birbirinden uzaklaşıp yakınlaştıkça metal elektrotlar arasında elektron akışı meydana gelmektedir. Bu elektron akışı güç oluşumu sağlamaktadır. Yüzey yük yoğunluğu, güç oluşum miktarı ile doğru orantılıdır. TENJ’lerde güç üretimi yapısında kullanılan malzemeye, temas yüzey alanına, yapı koşullarına ve ortama göre değişiklik göstermektedir. TENJ’lerde kullanılan malzemeler ele alındığında önceki çalışmalarda daha çok elektrot olarak üretimi kolay ve ucuz olan polimer malzemeler tercih edilmiş fakat bu malzemeler kolayca deforme olabildiğinden istenilen performans sağlanamamıştır. Bu olumsuzluklar değerlendirildiğinde polimer malzemelere göre daha uzun ömürlü ve hızlı elektron kaybetme özelliği bulunan yarıiletken malzemeler TENJ’ler için bir alternatif olmuştur (Zhang ve Quan, 2019). Çinko oksit yarıiletkenler (ZnO) sahip oldukları kimyasal

özellikleri, mekanik stabilite, yüksek elektriksel kırılım alanı, elektron doygunluk hızı, yüksek aktiviteleri ve ekonomik olması nedeniyle şeffaf elektronik uygulamalar için tercih edilen oksitlerdendir. Temel olarak ZnO'nun üç kristal fazı bulunmaktadır. Bunlar; B1 (kaya tuzu), B3 (çinko-blend) ve B4 (wurtzite)'dür. Özellikle 973 K'deki yüksek sıcaklık fazı wurtzite, band aralığı ve gelişen yüzey modifikasyonları ile daha yüksek yüzey enerjisiyle gelişmiş yüzey yük yoğunluğu özellikleri sergilemektedir. Sahip olduğu dielektrik özellikleri ve yüksek dipol momenti nedeniyle ZnO'in yakın gelecekte TENJ'lerde polimerlere alternatif olarak yer alması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında; elektrot olarak Cu (bakır) ve ITO-PET (indiyum kalay oksit-polietilen tereftalat) dielektrik malzeme olarak ise ZnO ince filmlerin kullanıldığı triboelektrik nanojeneratör geliştirilmiştir. ZnO ince filmler manyetik alanda sıçratma yöntemi kullanılarak Si(100) alttaşı üzerine farklı parametrelerde (sıçratma gücü, sıçratma basıncı, kısmi O₂ basıncı ve kalınlık) büyütülmüştür. Film değerlendirmeleri oda sıcaklığında ve ısıtma işlemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen ince filmlerin yapısal, elektriksel ve triboelektrik özellikleri incelenmiştir.

1. TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER

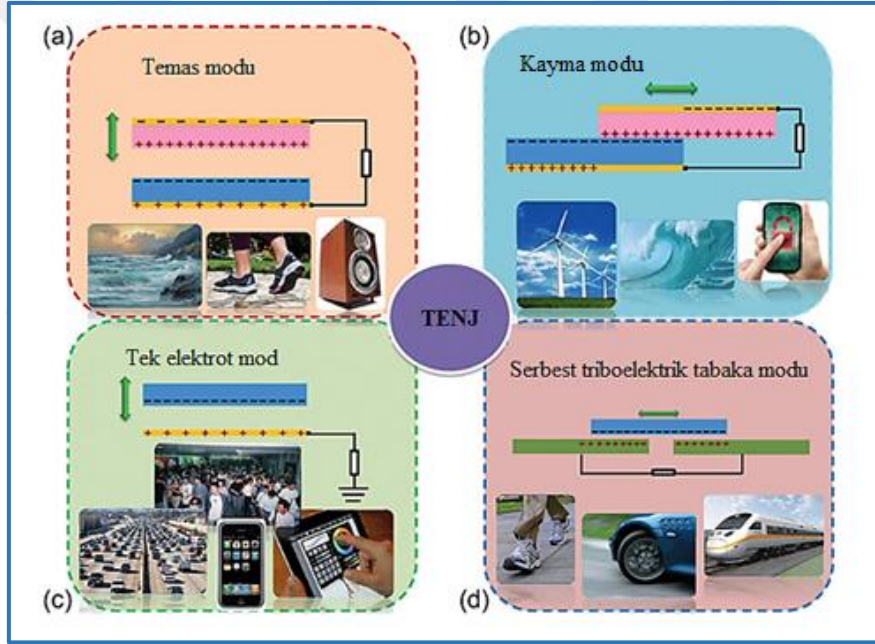
Triboelektrik nanojeneratörler (TENJ) triboelektrik etkiye dayalı yeni bir mekanik enerji üretimi sağlayan cihaz türüdür. Triboelektrik etki M.Ö Antik Yunanlılar tarafından kehribar ve hafif parçacıklar arasındaki çekicilik gözlemlenerek keşfedilmiştir. Bu etki günlük ve endüstriyel imalatla genellikle zararlı olarak kabul edilmekle birlikte TENJ'ler icat edildikten sonra önemi gittikçe artmıştır. Triboelektrik nanojeneratörler (TENJ'ler) enerjiyi toplayabildikleri ve kendi enerjileri kendilerine yeten sensör cihazları olarak çalışabildikleri için büyük ilgi görmektedir. Yapılan deneysel karşılaştırmalarda, teorik analiz, davranış optimizasyonu için düşük maliyetli ve zaman tasarrufu sağladıkları görülmüştür (Zhang ve Quan, 2019). TENJ'ler temelde; yük oluşturma katmanı, yük tutma katmanı, yük toplama katmanı ve yük depolama katmanından oluşmaktadır. Şekil 1'de TENJ'lerin temel yapısı gösterilmektedir (Kim vd., 2020).



Şekil 1. TENJ katmanları; **a)** yük oluşturma katmanı, **b)** yük tutma katmanı, **c)** yük toplama katmanı ve **d)** yük depolama katmanı

TENJ'ler için iki ana teorik modelin geliştirildiği temel TENJ teorileri oluşturulmuştur. Bunlar paralel plakalı kapasitör modeli ve mesafeye bağlı elektrik alanı (DDEF) modelidir. Paralel plakalı kapasitör modeli TENJ'ler için en temel modeldir. Düzlemsel konfigürasyonlara sahip TENJ'ler için uygundur ve düzlemsel olmayan TENJ'ler için geçerli değildir. DDEF modeli, rastgele konfigürasyonlara sahip TENJ'ler için geliştirilmiştir. Bu modele göre, yüklü yüzey değişimlerinin oluşturduğu elektrik alanı mesafeye bağlıdır.

TENJ'ler 4 farklı çalışma modundan oluşmaktadır. Bu modlar temas modu, kayma modu, tek elektrot modu ve serbest tabaka modu TENJ'lerdir. Şekil 2'de TENJ'lerin temel modlarının yapısına göre bazı kullanım alanları gösterilmiştir (Zhang ve Quan, 2019). Dikey temas ayrılma modu ve tek elektrot mod TENJ'lerin kullanım alanları benzer hareketlenme gösterdiklerinden genellikle aynıdır ve basınç-kuvvet etkisi ile çalışırlar. Bu modlar örnek olarak ayakkabı tabanına veya yer karosuna uygulanabilir. Düzlem içi kayar mod ve serbest triboelektrik tabaka modlarında benzer kayma hareketi gözlemlendiğinden kullanım alanları genellikle aynıdır. Kol içi-gövde kısımlarında, cep telefonu veya tablet ekran kaydırma ve yüzey silme uygulamalarında kullanılmaktadır. (Khushboo ve Azad, 2017; Shi vd., 2019; Yılmaz, 2020).



Şekil 2. TENJ temel modları ve bazı kullanım alanları; **a)** temas modu, **b)** kayma modu, **c)** tek elektrot mod, **d)** serbest triboelektrik tabaka modu

Triboelektrik nanojeneratörlerde iki malzeme temas ettiğinde, temas elektrifikasyonu nedeniyle yüzeylerde zıt statik yükler belirir. Eş zamanlı olarak, elektrostatik indüksiyonun etkisi altında elektrotlar üzerinde yükler indüklenir. Yükler, iki elektrot arasında harici bir devre boyunca akabilir ve farklı elektriksel yüklere sahip malzemeler olduğunda potansiyel bir fark yaratılır. Bu durum aslında Maxwell'in yer değiştirme akımı olan triboelektrik nanojeneratörlerin çıkış

akımını oluşturmaktadır. Maxwell'in tanımladığı yer değiştirme akımı, hareket eden yüklerin neden olduğu akımdan ziyade elektrik alanın yer değiştirme akısının zamana göre kısmi türevidir ve denklem 1 ile tanımlanır.

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

Burada J_D yer değiştirme akım yoğunluğu, D yer değiştirme alanı, ϵ_0 vakumdaki geçirgenlik, E elektrik alan, P ise polarizasyon alanını ifade etmektedir. Bir triboelektrik nanogeneratörde karşılık gelen yer değiştirme akımı yoğunluğu ise denklem 2'de verilmiştir.

$$J_D = \frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_1(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

Denklemde verilen $\sigma_1(z, t)$ ifadesi elektrotta biriken yük yoğunluğudur. Akım yoğunluğunun alan (A) ile çarpımı ise triboelektrik nanogeneratörlerin çıkış akımını oluşturur (denklem 3).

$$I = \frac{dQ}{dt} = A \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (3)$$

Yukarıda verilen eşitliklerden (2 ve 3. denklem) TENJ'lerin çıktısının kökeni aslında Maxwell 'in yer değiştirme akımı olduğu görölmektedir (Zhang ve Quan, 2019).

1.1. Paralel Plakalı Kapasitör Modeli TENJ

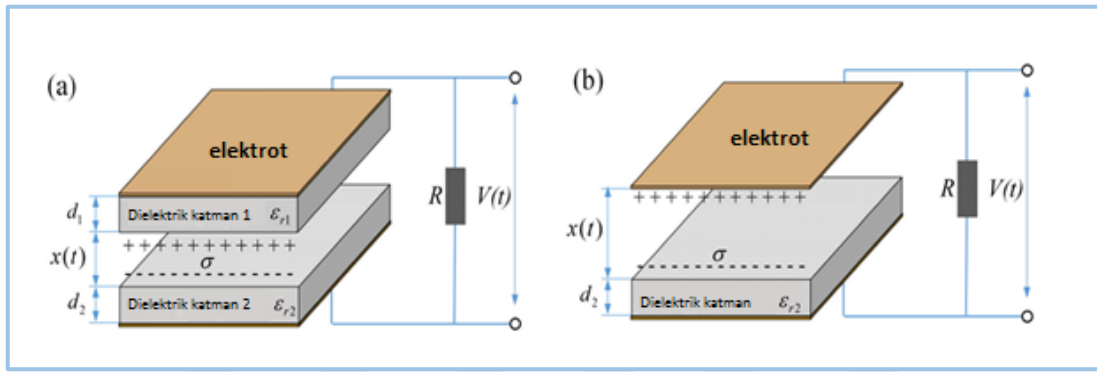
Paralel plakalı kapasitör modeli, düzlemsel yapılara sahip TENJ'lere uygulanabilir. Bu modelde TENJ'ler için iki temel varsayım vardır. İlki yüklerin dielektrik yüzeye eşit olarak dağıtıldığı, ikincisi ise dielektrik içindeki plakaya dik bir elektrik alan bileşeni varlığı ve plakaya paralel bileşenin ihmal edildiğidir. V-Q-x ilişkisi (ıkış voltajı V , iki elektrot arasında aktarılan yüklerin miktarı Q ve ayırma mesafesi x) TENJ'ler için paralel levha kondansatör modelin önemli bir parçasıdır. Üç önemli parametrenin ilişkisini denklem 4'deki gibidir.

$$V = -\frac{1}{C(x)}Q + V_{oc}(x) \quad (4)$$

Burada V iki elektrot arasında oluşan potansiyeli farkı, $V_{OC}(x)$ polarize yüklerin katkıda bulunduğu potansiyel farkı ve $-\frac{Q}{C(x)}$ transfer edilen yüklerin katkıda bulunduğu potansiyel farkı ifade etmektedir (Zhang ve Quan, 2019).

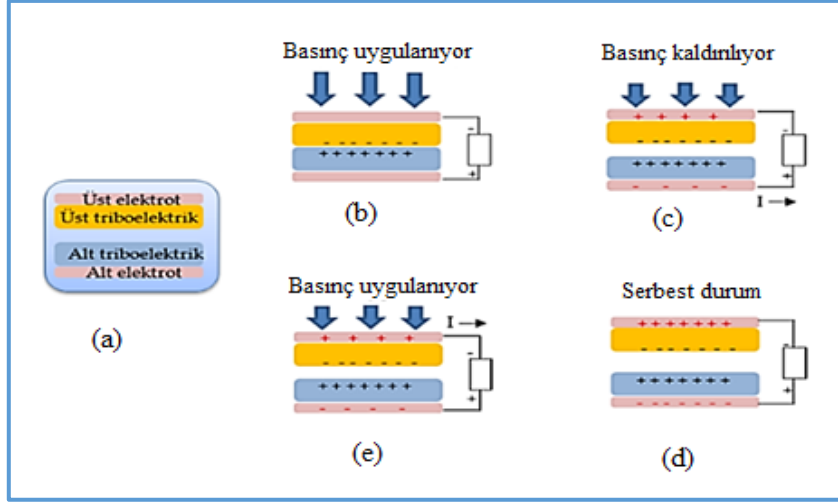
1.1.1. Temas Modu TENJ'ler

Temas modu TENJ'ler yapılarında kullanılan malzemeye göre iki farklı kategoride incelenir. Bunlar Şekil 3'te gösterilen dielektrik-dielektrik (Şekil 3a) temas ve iletken-dielektrik (Şekil 3b) temastır (Zhang ve Quan, 2019).



Şekil 3. TENJ; **a)** dielektrik-dielektrik temas mod, **b)** iletken-dielektrik temas mod

Şekil 4'de temas modu TENJ'lerin çalışma prensibi ve yapısı gösterilmektedir (Yılmaz, 2021). Temas modu TENJ'lerin yapısını oluşturan üst ve alt kısmındaki plakada zıt yük almaya eğilimli (pozitif-negatif) iki triboelektrik malzeme ve metal elektrotlar bulunur. İki plaka arasında hava boşluğu bulunmaktadır. İki plaka harici bir mekanik kuvvet ve yüzeylerde oluşan elektrostatik yükler nedeniyle fiziksel temasa geçmektedir. İki plaka temas ettiğinde triboelektrik malzemelerin yüzeyinde triboelektrifikasyon nedeniyle pozitif ve negatif yüklenmeler meydana gelir. İki plaka ayrıldığında ise elektrotlar üzerinde ise zıt yüklenmeler oluşur ve bir elektrottan diğer elektrota yük geçişi meydana gelir. Serbest bırakma esnasında yani basıncın kaldırıldığı durumda ise akım akışı olmaz. İki plaka tekrar temasa geçtiğinde ise tekrar akım akışı gözlemlenir. Tekrarlanan bir hareket mevcuttur.



Şekil 4. Temas modu TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibi; **a)** ilk durum, **b)** temas, **c)** ayrılma, **d)** serbest bırakma, **e)** temas hali

Temas modu TENJ'lerin polarize yüklerin katkıda bulunduğu potansiyel farkı $V_{OC}(x)$ ve kapasitansı $C(x)$ aşağıda verilen formüller ile hesaplanır (denklem 5 ve 6).

$$V_{OC}(x) = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 S}{d_0 + x(t)} \quad (6)$$

Burada; ϵ_0 vakumdaki geçirgenlik, σ kullanılan triboelektrik malzemelerin temas yüzeyindeki yük yoğunluğu, S malzemelerin temas alanı ve d_0 eşdeğer kalınlıktır. Eşdeğer kalınlığın ifadesi ise denklem 7'de gösterilmiştir. İletken dielektrik temas modu için $d_1 = 0$ 'dır.

$$d_0 = \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \quad (7)$$

Temas modu TENJ'lerin gerilim (V), yük (Q) ve ayırma mesafesi (x) arasındaki ilişki de denklem 8'de gösterilmiştir. Ohm kanunu ve denklem 8 birleştirilerek, denklem 9'da gösterilen Q ile ilgili birinci dereceden diferansiyel denklem elde edilmektedir. TENJ'lerin çıktı özelliklerini tanımlamak için kullanılmaktadır.

$$V = - \frac{Q}{S\epsilon_0} (d_0 + x(t)) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (8)$$

$$R \frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{S\epsilon_0} (d_0 + x(t)) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (9)$$

Başlangıç koşulu $Q(t = 0) = 0$ benimsenirse, denklem 9 çözülebilir ve Q 'nın ifadesi elde edilir.

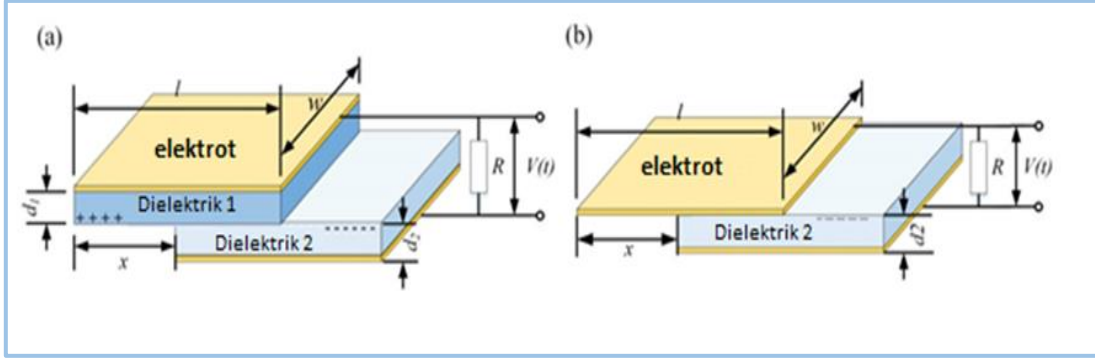
$$\begin{aligned} V(t) = R \frac{dQ}{dt} = & -\frac{\sigma d_0}{\epsilon_0} + \frac{\sigma(d_0 + x(t))}{\epsilon_0} \times \exp\left(-\frac{1}{RS\epsilon_0} \left(d_0 t + \int_0^t x(t) dt\right)\right) \\ & + \frac{\sigma d_0}{\epsilon_0} \frac{d_0 + x(t)}{RS\epsilon_0} \times \int_0^t \exp\left(-\frac{d_0(t-\tau)}{RS\epsilon_0} - \frac{1}{RS\epsilon_0} \int_\tau^t x(z) dz\right) d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

Q ve V arasında ilişkiye göre çıkış voltajı denklem 10'da verilmiştir (Zhang ve Quan, 2019).

1.1.2. Kayma Modu TENJ'ler

Kayma modu TENJ'ler triboelektrik katman olarak kullanılacak malzemelerin farklılığına göre temas modu TENJ'ler gibi iki kategoride incelenir. Kayma modu TENJ'lerin yapısı Şekil 5'te verilmiştir (Zhang ve Quan, 2019). Burada (a) dielektrik-dielektrik kayma modu, (b) iletken-dielektrik kayma modu TENJ'dir. Kayma modu TENJ'ler için iki temel varsayım vardır. İlki uzunluk (l), dielektrik 1 ve dielektrik 2'nin katman kalınlığından (d_1 ve d_2) çok daha büyük olmalıdır, tersi olduğu durumda plakaya paralel olan elektrik alan bileşeni yok sayılamaz. İkincisi ayırma mesafesi (x) $0,9 l$ 'den küçük olmalıdır. Aksi takdirde, çok küçük üst üste binen alan nedeniyle, üst üste binen alanın kapasitansı artık cihazın kapasitansını temsil etmeyecektir ve elektrotlar ve dielektrik yüzeyler üzerindeki yük dağılımı da temel varsayımdan sapacaktır. İki gereksinim karşılandığında, kenar etkisi ihmal edilir ve toplam kapasitans denklem 11'de verilen ifadeye sahiptir (Zhang ve Quan, 2019). Burada w genişliği, l uzunluğu, x ayırma mesafesini, d_0 eşdeğer kalınlığı ve ϵ_0 vakum geçirgenliğini ifade etmektedir.

$$C(x) = \epsilon_0 w(l - x)/d_0 \quad (11)$$



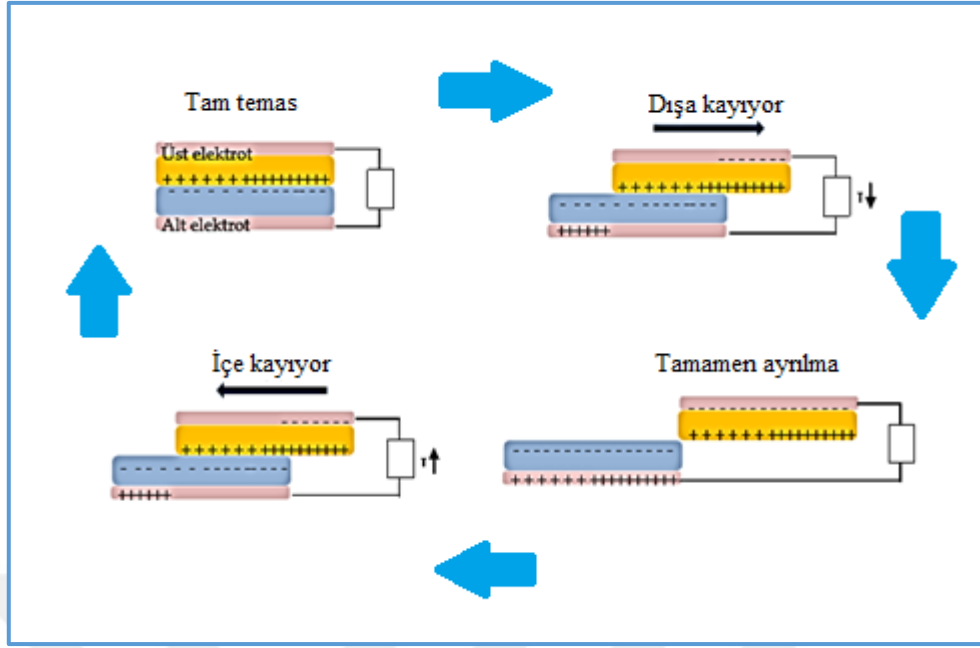
Şekil 5. TENJ; **a)** dielektrik-dielektrik kayar mod, **b)** iletken-dielektrik kayar mod

$V_{OC}(x)$ elektrotların üzerinde oluşan yüklerin dağılımına bağlıdır. Kayma modu TENJ'lerde iki plaka birbirini üzerinden ayrıldığında, üst üste binmeyen kısımda d_1 'in alt yüzeyinde ve d_2 'nin üst yüzeyinde Şekil 5a ve 5b'de gösterildiği gibi yükler oluşmaktadır. Yukarıdaki varsayımlar altında üst ve alt elektrotlar üzerindeki temas eden yüzeylerin yüzey yük yoğunluğu sırasıyla σ ve $-\sigma$ olarak ifade edilmiştir. Üst ve alt elektrotta temas etmeyen bölge için ise yüzey yük yoğunluğu sırasıyla $\sigma x/(l-x)$ ve $-\sigma x/(l-x)$ 'dir. Yük dağılımı ile Gauss teoremini birleştirerek $V_{OC} = \sigma x d_0 / (\epsilon_0 (l-x))$ ifadesi elde edilir. Kayma mod TENJ'lerin V-Q-x ilişkisi denklem 12'deki gibidir.

$$V = -\frac{d_0}{w\epsilon_0(l-x)}Q + \frac{\sigma d_0 x}{\epsilon_0(l-x)} \quad (12)$$

Ohm kanunu ve denklem 12 birleştirilerek, Q ile ilgili birinci dereceden diferansiyel denklem elde edilebilir ve bu da $Q(t=0) = 0$ başlangıç koşuluyla çözülebilir. Q ve V arasındaki ilişkiye göre kayma mod TENJ'lerin çıkış voltajı denklem 13'te gösterildiği gibi elde edilebilmektedir.

$$V = \frac{\sigma d_0}{\epsilon_0} \left(\frac{1}{l-x(t)} \exp \left(-\frac{d_0}{\epsilon_0 R S} \int_0^t \frac{1}{l-x(t')} dt' \right) \right) + \left(\frac{d_0}{\epsilon_0 R S} \frac{1}{l-x(t)} \int_0^t \exp \left(\frac{d_0}{\epsilon_0 R S} \int_t^{t'} \frac{1}{l-x(\delta)} d\delta \right) dt' - 1 \right) \quad (13)$$

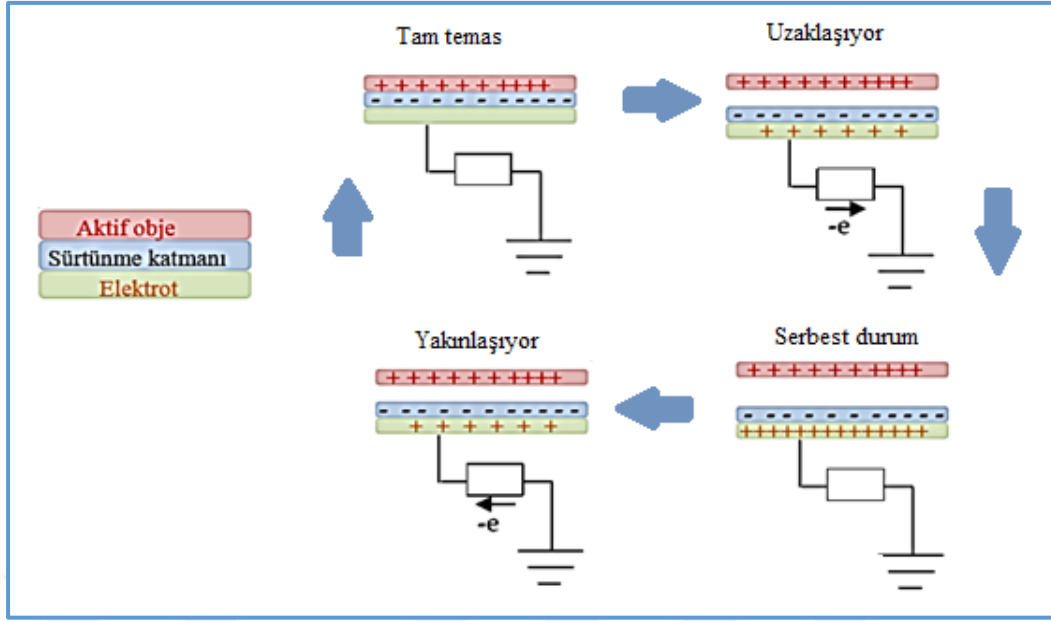


Şekil 6. Kayma mod TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibi

Şekil 6'da kayma modu TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibinin aşamalarının şematik görünümü verilmiştir (Yılmaz, 2021). Başlangıçta, üst ve alt elektrotun bulunduğu iki plaka temas halindedir. Triboelektriklenme nedeniyle plakaların bir yüzeyinde pozitif yükler belirirken, diğer yüzeyde ise eşit miktarda negatif yük belirlemektedir. Üst yüzey yana kayınca, yüzeylerin temas alanı azalır ve düzlemsel yük ayrılması meydana gelir. Böylece potansiyel bir fark yaratır ve üst elektrottan alt elektrota doğru devre boyunca akım akmaya başlar. Bu süreç, yüzeyler birbirlerinin üzerinde tam anlamıyla kayıncaya kadar devam eder. TENJ'ler temas modunda dikey yönde kayar modda ise yatay yönde temas ayrılma hareketi yapmaktadır (Yılmaz, 2021).

1.1.3. Tek Elektrotlu Mod TENJ'ler

Tek elektrot modlu TENJ'leri 2013 yılında Yang ve arkadaşları geliştirilmiştir (Yang vd., 2013c). Tek elektrotlu mod TENJ'lerin Şekil 7'de katman yapısı ve çalışma şekli gösterilmiştir (Yılmaz, 2021). Tek elektrot mod TENJ'ler genelde sürtünme tabakası, topraklanmış elektrot ve hareketli aktif elemandan oluşmaktadır.

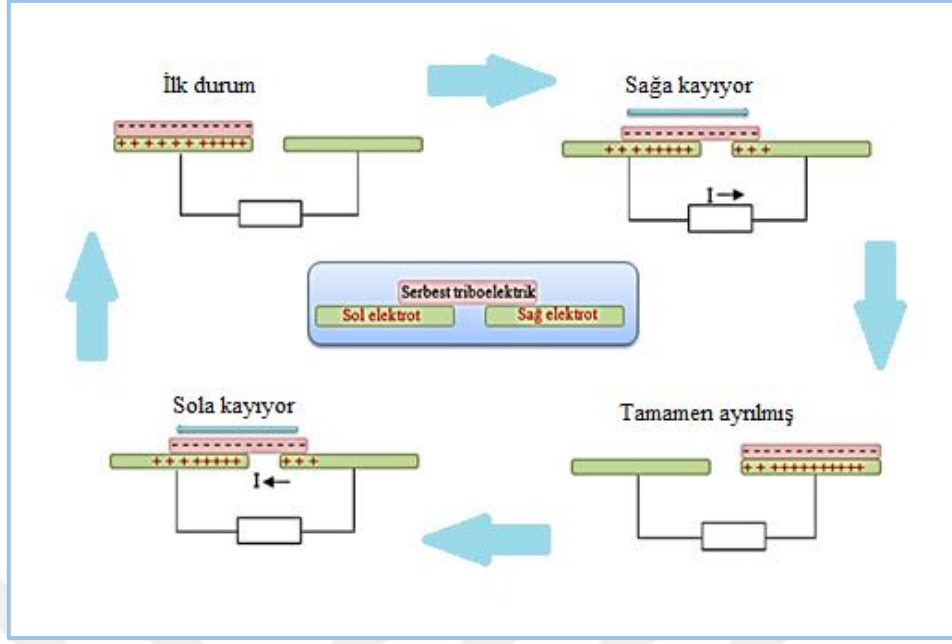


Şekil 7. Tek elektrot mod TENJ'lerin yapısı ve çalışma prensibi

Aktif parça sürtünme tabakasından uzaklaşınca elektrot pozitif yükü yüklenir. Bunun sonucunda elektrot ve toprak arasında potansiyel fark oluşarak elektrottan toprağa elektron akışı gerçekleşir. Aktif elemanın uzak olduğu durumda ise sürtünme yüzeyi ile elektrot arasında elektriksel denge oluşumu (serbest durum) gerçekleşir ve elektrik akımının durmasına yol açar. Aktif eleman sürtünme katmanına yaklaştığında elektrot ve toprak arasında oluşan potansiyel fark topraktan elektrotu akmaya başlar. Bu şekilde aktif eleman ve toprak arasındaki hareket dış devrede yük oluşumuna sebep olmaktadır (Yılmaz, 2021).

1.1.4. Serbest Triboelektrik Tabaka Modu

Serbest triboelektrik tabaka modu TENJ'leri 2014 yılında Wang ve arkadaşları geliştirilmiştir (Wang vd., 2014). Serbest triboelektrik tabaka modu Şekil 8'de gösterildiği gibi hareketli bir triboelektrik katman ile sabit iki elektrot arasındaki sürtünmeye dayanmaktadır (Yılmaz, 2021). Triboelektrik katman diğer modlarda iki dielektrik arasındaki kasıtlı sürtünme ile yapay olarak yüklenirken, bu modda doğal sürtünme ile yüklenir. Ayrıca triboelektrik katman üzerindeki yükler uzun süre dayanabileceğinden harici mekanik aktüatör ile periyodik elektrifikasyona ihtiyaç duymaz (Kim vd., 2021).



Şekil 8. Serbest triboelektrik tabaka modu TENJ çalışma prensibi

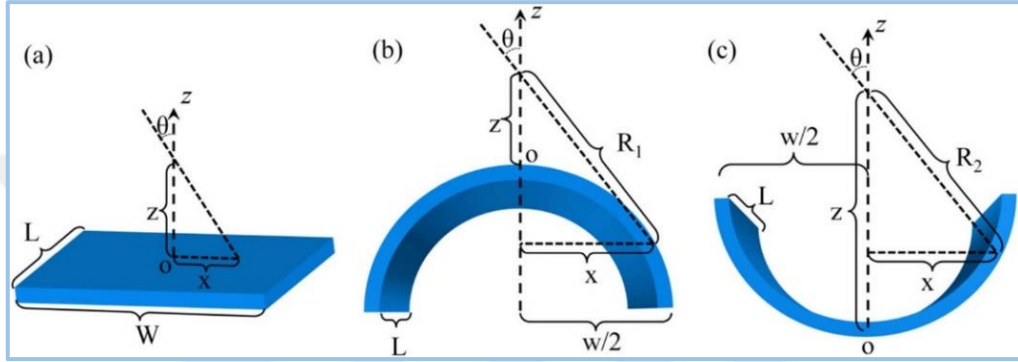
Hareket eden triboelektrik katmanın düzensiz hareketi nedeniyle, elektrot ile yüklü malzeme arasındaki mesafeyle değişen değişken elektrik alanı indüklenir. Bu değişken elektrik alan aralarında potansiyel bir fark oluşmasına neden olarak triboelektrik gücü indükler. Temas ayırma ve kayma modun aksine bağımsız triboelektrik katman modu, malzemeler arasında doğrudan temas içermediğinden malzemenin yüzey aşınması büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu da triboelektrik malzemesinin uzun ömürlü olmasını katkı sağlamaktadır. Fakat diğer modlara göre daha düşük gerilim üretilmektedir (Kim vd., 2021).

1.2. Mesafeye Bağlı Elektrik Alanı (DDEF) Modeli TENJ'ler

Düzlemsel olmayan bir biçime sahip TENJ cihazlarının özelliklerini tahmin etmek için DDEF modeli geliştirilmiştir. Bu modelin teorik yapısı Şekil 9'da gösterilmektedir (Zhang ve Quan, 2019). Şekil 9a'da gösterildiği gibi düzlemsel yapıya sahip ve yüzeyinde yük yoğunluğu σ olan dikdörtgen bir plaka ($L \times W$) için z eksenine boyunca orta nokta üzerindeki elektrik alan, Gauss yasası kullanılarak hesaplanabilir. Dikdörtgen bir düzlem için DDEF'in ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$E_z = \int dE_z = \frac{\sigma}{\pi\epsilon} \arctan \left(\frac{L/W}{2 \left(\frac{z}{W} \right) \sqrt{4 \left(\frac{z}{W} \right)^2 + \left(\frac{L}{W} \right)^2 + 1}} \right) = \frac{\sigma}{\pi\epsilon} f(z) \quad (14)$$

Burada; Z yüzeye olan uzaklık, ϵ vakumun geçirgenliğini ifade eder. Şekil 9b ve 9c'de gösterildiği gibi düzlemsel olmayan yüzeyler içinde DDEF aynı yöntemle hesaplanabilir.



Şekil 9. TENJ yüzeyleri; **a)** düzlemsel, **b)** dışbükey ve **c)** içbükey

Şekil 9b'de gösterilen w çapında ve L uzunluğunda yay eğimli bir yüzey ele alındığında z eksenı boyunca dışbükey yüzeyin orta noktası üzerinde oluşan toplam elektrik alan denklem 15 ve 16 kullanılarak ifade edilir.

$$E_{z,\text{dışbükey}} = \frac{\sigma L}{\pi\epsilon_0} \int_0^{w/2} \frac{\left(z + \frac{w}{2} - \sqrt{\frac{w^2}{4} - x^2} \right)}{R_1^2 \sqrt{4R_1^2 + L^2}} dx \quad (15)$$

$$R_1^2 = x^2 + \left(z + \frac{w}{2} - \sqrt{\frac{w^2}{4} - x^2} \right)^2 \quad (16)$$

Benzer şekilde Şekil 9c'de gösterilen z eksenı boyunca içbükey yüzeyin orta noktası üzerindeki genel elektrik alan denklem 17 ve 18 ile ifade edilmektedir (Zhang ve Quan, 2019).

$$E_{z,içbükey} = \frac{\sigma L}{\pi \epsilon_0} \int_0^{w/2} \frac{\left(z + \frac{w}{2} - \sqrt{\frac{w^2}{4} - x^2}\right)}{R_2^2 \sqrt{4R_2^2 + L^2}} dx \quad (17)$$

$$R_2^2 = x^2 + \left(z - \frac{w}{2} + \sqrt{\frac{w^2}{4} - x^2}\right)^2 \quad (18)$$

Yüklü yüzeylerin ürettiği elektrik alan, yüklü mikro elementlerin yüzey boyunca entegre edilmesiyle hesaplanır. Bundan dolayı elektrik alan, uzay boyunca tekdüze olmaktan ziyade mesafeye bağlıdır. Genel olarak paralel plakalı kapasitör ve DDEF modelleri, TENJ'lerin simülasyonu için iki temel modeldir. Paralel plakalı kapasitör modelinde, elektrik alan sonsuz yüklü bir düzlem varsayımı altında elde edilir. Tribo-çiftleri birbirine paraleldir ve tribo-çiftleri arasındaki elektrik alanı düzgün bir şekilde dağılmıştır. DDEF modelinde ise, tribo-çifti paralel olmayabilir ve düzlemsel yapıda olması gerekmez. Yüklü yüzeyin elektrik alanı, yüklü mikro elementlerin yüklü yüzey boyunca entegre edilmesiyle hesaplanmaktadır. Bu özellikler DDEF modeli için daha geniş uygulama alanı sağlamaktadır.

1.3. Triboelektrik Nanogeneratörler İçin FOM (Figure Of Merit)

Triboelektrik nanogeneratörlerin performanslarını nicel olarak değerlendirmek için karakterizasyon yöntemi olan FOM'lar (Figure of merit) geliştirilmiştir. Bunlar; malzeme FOM, cihaz FOM ve performans FOM'dur. FOM'lar triboelektrik nanogeneratörlerin seri üretimi ve ticarileşmesine büyük katkı sağlamaktadır.

Triboelektrik tabakalarda kullanılan malzemeler TENJ'lerin performansını etkilemektedir. TENJ'lerin performansının malzeme cinsinden değerlendirmek üzere malzeme FOM (FOM_m) kullanılmaktadır. TENJ'lerde aktarılan yük Q ve çıkış voltajı V , doğrusal bir ilişki gösteren yüzey yük yoğunluğuna (σ) bağlıdır. Diğer bir deyişle, diğer tüm koşullar aynı olduğunda, σ artışı, çıkış voltajının orantılı artışına ve ortalama çıkış gücünün büyümesine yol açacaktır. Olası maksimum yüzey yük yoğunluğu, doğrudan malzeme tipi tarafından belirlenir. Malzemelerin yüzey yük yoğunluğu, 19. denklemde verildiği gibi FOM_m 'yi tanımlamak için kullanılmaktadır. FOM_m , malzeme

özelliğinin çıkış gücüne katkısını temsil eder ve yalnızca σ parametresini içermektedir (Zhang ve Quan, 2019; Zi vd., 2015).

$$FOM_m = \sigma^2 (C^2/m^4) \quad (19)$$

Malzeme etkisine ek olarak triboelektrik nanojeneratörlerin yapısı ile ilgili diğer parametrelerde çıktı performansını etkilemektedir. Bu nedenle bu özelliklerinin etkisini değerlendirmek amacıyla cihaz FOM (FOM_{cihaz}) kullanılmaktadır. FOM_{cihaz} denklem 20 ile tanımlanmaktadır. Burada $\bar{v}$ mekanik hareketin ortalama hızı, $\bar{P}^*$ ortalama boyutsuz güç, σ yüzey yük yoğunluğudur.

$$FOM_{\text{cihaz}} = \bar{P}^* \frac{\sigma^2}{\epsilon_0} = 0,064 \frac{\sigma^2 \bar{v}}{\epsilon_0} \quad (20)$$

Performans FOM ise cihaz FOM' dan farklı olarak olası en yüksek çıktı gücünü temsil eder ve yapısal parametreleri ayarlayarak maksimum çıkış enerjisi açısından değerlendirir. Temel amaç TENJ'lerin performansını iyileştirmektir. Performans FOM ($FOM_{\text{performans}}$) denklem 21 ile tanımlanmaktadır.

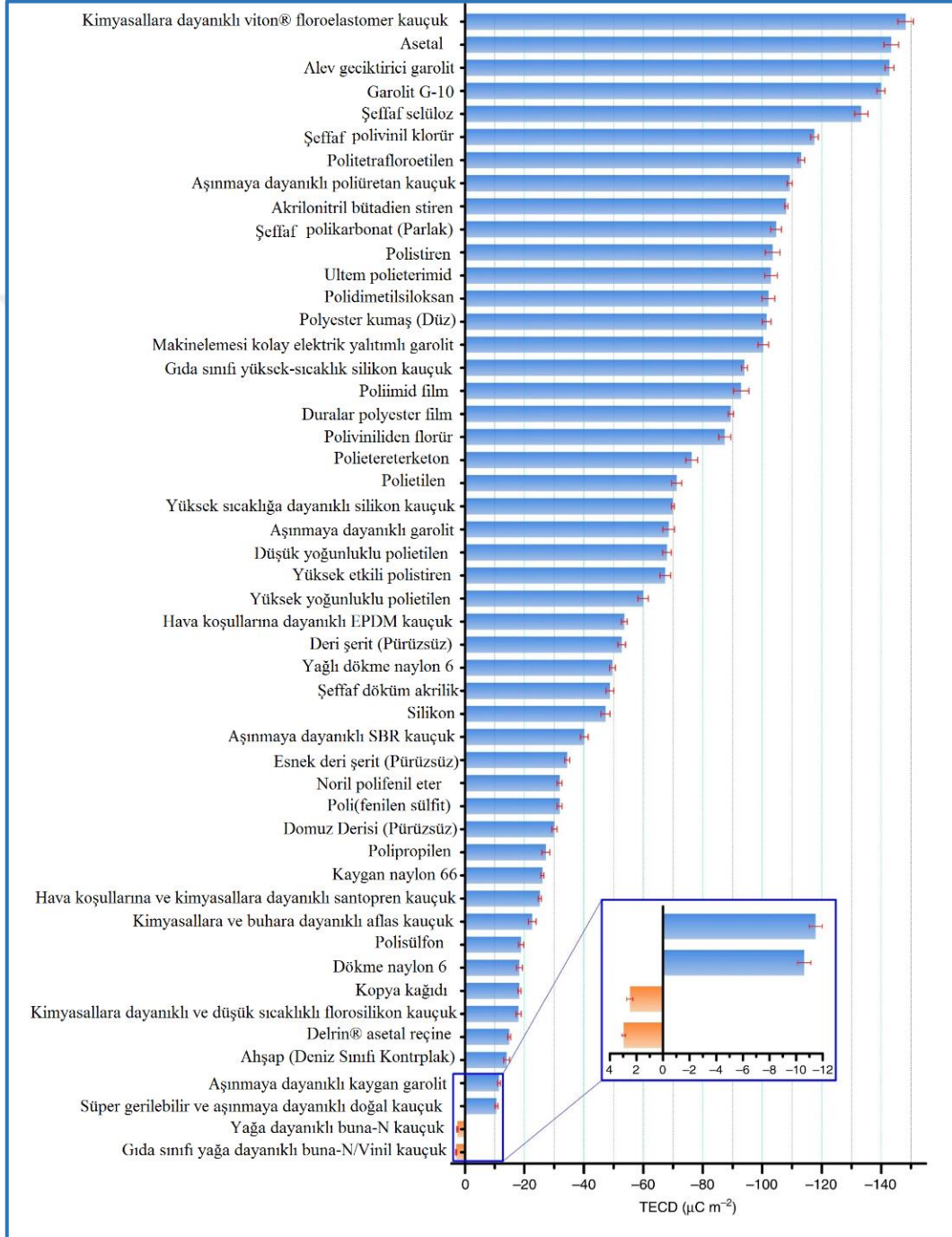
$$FOM_{\text{performans}} = 2\epsilon_0 \frac{E_m}{Ax_{\max}} \quad (21)$$

Burada; E_m döngü başına mümkün olan en büyük çıktı enerjisi, $x_{\max}$ tribo çiftinin maksimum yer değiştirmesi ve A temas alanıdır (Zhang ve Quan, 2019).

1.4. TENJ'lerde Kullanılan Malzemeler

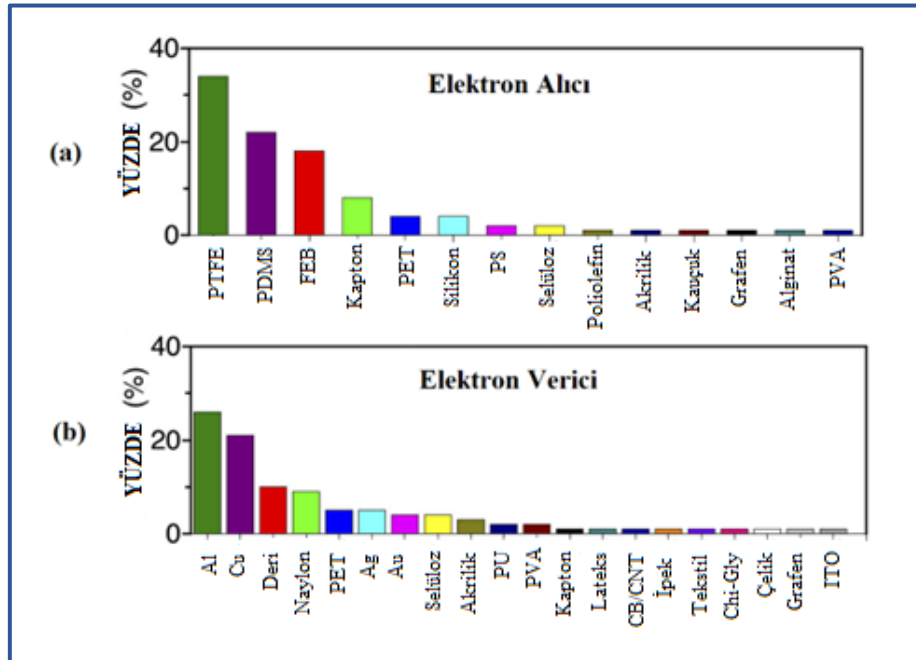
TENJ'lerin üretiminde ve malzeme seçiminde malzemenin elektriksel özelliklerinin yanında hafiflik, ince tabaka oluşturma, dayanıklılık ve biyo-uyumluluk gibi özelliklerinde sağlanması gerekmektedir. Dört temel çalışma modundan temas modu ve tek elektrot mod TENJ'ler dikey temas hareketine sahiptir ve malzeme seçenekleri oldukça geniştir. Şu anda kullanılan malzemelerin neredeyse tamamı bu iki modda kullanılabilir. Kayma modu ve serbest triboelektrik katman modu TENJ için ise sürtünme sonucu oluşan deformasyonu azaltmak için düşük sürtünme katsayısı olan malzemeler kullanılmalıdır. Malzemelerin birbirleri üzerinde kayması, yüksek sürtünme katsayılarına sahip olmaları durumunda malzemeleri aşındırabilir. Bu özel

gereklilik, kayma modu ve serbest triboelektrik katman modu için malzeme seçeneklerini sınırlar. Örnek olarak PTFE (politetrafloroetilen) ve FEP (florlu etilen propilen), düşük sürtünme katsayılarından dolayı bu iki modda çoğunlukla elektron alıcısı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 10. Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilen triboelektrik seri

Prensip olarak, iki triboelektrik malzeme arasında yük afinitesinde mümkün olduğunca büyük bir fark olmalı veya triboelektrik seride mümkün olduğunca birbirinden uzak olmalıdır. Triboelektrik seri, bir malzemenin listedeki diğer malzemelere göre ne kadar hızlı yük geliştirdiği gibi belirli özelliklere göre sıralanan bir malzeme listesidir. Triboelektrik seride birbirinden uzak iki malzeme temas ettirildiğinde aralarında daha fazla potansiyel fark oluşmaktadır. Birbirine yakın yerleşmiş malzemelerin temasında ise çok az potansiyel fark oluşmaktadır. İlk triboelektrik seri, 1757'de İsveçli fizikçi Johan Carl Wilcke tarafından yayınlanmıştır. Triboelektrik serilerin uzun geçmişine rağmen çoğunlukla nitel verilere dayanmaktadır. Günümüzde ise 2019 yılında Prof. Zhong Lin Wang ve arkadaşları tarafından yeni triboelektrik seri geliştirilmiştir. Şekil 10'da Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilen triboelektrik seri verilmiştir (Wang vd., 2019). Wang ve arkadaşları test ettikleri malzemelerin triboelektrik yük yoğunluğunu, güvenilir değerler elde etmek için sabit sıcaklık, basınç ve nem ile iyi tanımlanmış koşullar altında sıvı cıvaya göre temas ayırma moduyla, triboelektrifikasyona dayalı olarak farklı malzemelerin triboelektrik yük yoğunluğunu (TECD) ölçebilen yeni bir yöntem geliştirmişlerdir.



Şekil 11. Zhang ve Olin'in yaptıkları çalışma sonucu TENJ'lerde; **a)** elektron alıcı, **b)** elektron verici olarak kullanılan malzemeler

Tablo 1’de triboelektrik enerji üretimi için kullanılan malzemeler ve malzemelerin yüzey topografyaları verilmiştir. TENJ’lerin yapısında pozitif ve negatif yük ile yüklenen malzemelerin yanı sıra farklı iletken özellikli elektrotlar kullanılmaktadır. Bakır, alüminyum, gümüş, nikel, altın, paslanmaz çelik, ITO, grafen ve karbon nanotüp TENJ’lerde yaygın olarak kullanılan elektrotlar arasındadır. Zhang ve Olin 2020 yılında yaptıkları çalışmada 2012-2020 yılları arasında rastgele seçtikleri 100 çalışma içerisinde TENJ cihazlarında elektron alıcı ve verici olarak kullanılan malzemeler ve yüzdelik kullanım oranlarını belirlemişlerdir. Şekil 11’de Zhang ve Olin’in yaptıkları çalışma sonucu gösterilmektedir (Zhang ve Olin, 2020). TENJ çalışmalarında elektron alıcı (akseptör) olarak politetrafloroetilen (PTFE), polidimetil-siloksan (PDMS), florlu etilen propilen (FEP) ve kapton en çok kullanılan malzemeler arasındayken poliviniliden florür (PVDF), poliolefin, polistiren (PS), polyester (PET), silikon, bakteriyel nanoselüloz (BNC), aljinat sodyum, nitroselüloz, grafen, akrilik, kauçuk ve polivinil alkol (PVA) da kullanım bulan diğer malzemelerdir. Elektron verici (donör) olarak ise Al (alüminyum), Cu (bakır), deri ve naylon en çok kullanılan malzemeler arasındayken; PET, akrilikler (PMMA), poliüretan (PU), Au (altın), kapton, selüloz (nanofibriller, ahşap ve kağıt), indiyum kalay oksit (ITO), lateks, karbon siyahı/karbon nanotüpler (CB/CNT), tekstil, grafen, kitosan-gliserol (Chi-Gly), ipek, PVA da kullanım bulan diğer malzemelerdir (Zhang ve Olin, 2020).

Tablo 1. Triboelektrik enerji üretimi için kullanılan malzemeler ve yüzey topografyaları

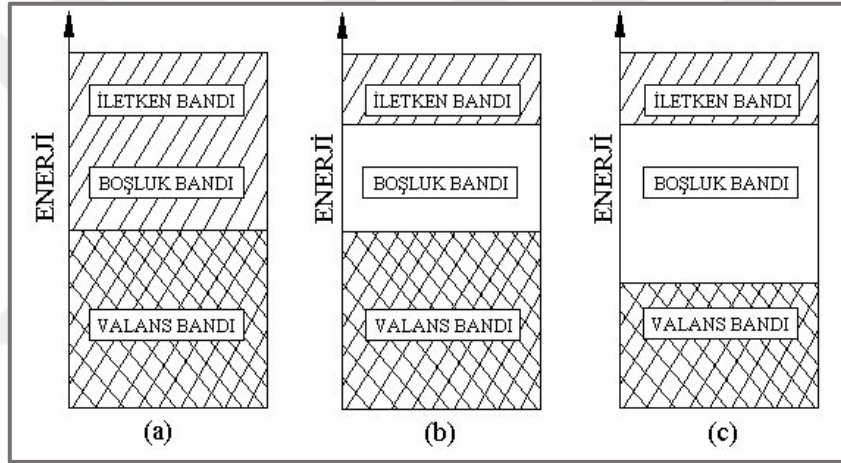
Materyal	Yüzey topografyası/işleme	Referans
PTFE	Kazınmış nanopartikül topografyası	(Yang vd., 2012)
Kapton	Kuru kazınmış nanoteller	(Zhu vd., 2012)
PDMS	Dışbükey kubbe şeklindeki yapılar	(Hou, vd., 2012)
PDMS	Mikropillar	(Yang vd., 2012)
Al	Nanoporlar	(Bai vd., 2013)
Au	Nanopartiküller	(Zhu vd., 2013)
TiO ₂	Nano teller	(Lin vd., 2013a)
Al	Nanoporlar	(Yang vd., 2013a)
PTFE	Nanoteller	(Yang vd., 2013b)
Ag	Nanotel/nanopartikül kompozit	(Lin vd., 2013b)
Al	Ortalama büyüklükteki nanoyapılar ~200 nm	(Han vd., 2013)

Tablo 1 (Devam). Triboelektrik enerji üretimi için kullanılan malzemeler ve yüzey topografyaları.

PDMS	Nanotel	(Yang vd., 2013c)
Si	Piramit şeklindeki doku	(Yang vd., 2013d)
SiO ₂	Nanopartiküller	(Cheng vd., 2013)
FEP	Kuru kazınmış nanotel yapıları	(Yang vd., 2013e)
Kapton	PTFE nanopartiküller ile dağılmış	(Jing vd., 2014)
Polivinil klorür	Nanoteller	(Du vd., 2014)
Cu	Kazınmış Si yapıları üzerine Cu kaplayarak mikro pürüzlülük	(Guo vd., 2014)

2. YARIİLETKEN MALZEMELER

Katılar, elektrik akımını geçirme durumuna bağlı olarak 3 farklı grupta incelenmektedir ve iletken, yalıtkan ve yarıiletken malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Malzemelerin elektrik akımını iletmesi durumu iletkenlik ile valans bandı arasında gerçekleşmektedir. İletkenlerde valans ile iletkenlik bandı arasında boşluk bulunmaz ve elektrik akımı kolaylıkla geçmektedir. Yalıtkanlarda iletkenlik ve valans bandı arasında bulunan boşluk çok fazladır. Elektrik akımı bu boşluğu aşamadığı için yalıtkanlar elektriği iletmezler. Yarıiletken malzemelerde ise iletkenlik ile valans bandı arasında bulunan boşluk yalıtkanlara göre daha azdır.



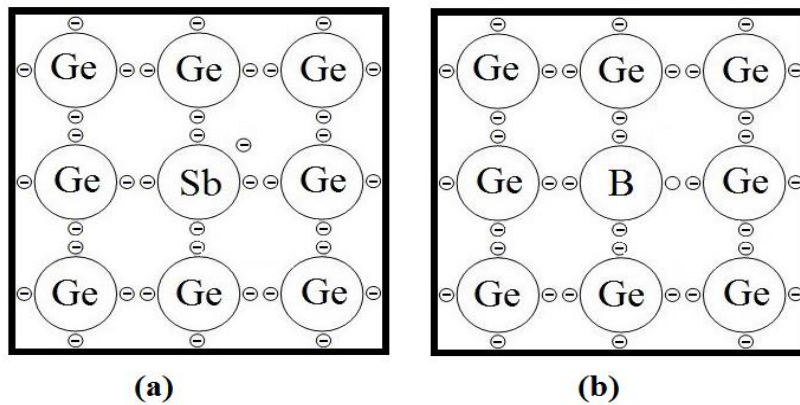
Şekil 12. Enerji band diyagramı; **a)** iletken, **b)** yarıiletken, **c)** yalıtkan

Şekil 12’de iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin enerji band diyagramları gösterilmiştir (Enerji seviyeleri ve band yapıları, 2022). Yarıiletken ve yalıtkan malzemelerde mutlak sıfırda valans bandı tam dolu, iletkenlik bandı boş veya bir kısmı doludur. İletken malzemelerde ise mutlak sıfırda iletkenlik bandının belli kısmı doludur. Mutlak sıfır seviyesinde yukarı çıktıkça yani sıcaklık artırıldıkça elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçmeye başlarlar. Elektronların geçişi ile jenerasyon dediğimiz elektron-delik çiftleri meydana gelmektedir. Valans bandında iletkenlik bandına geçen elektronun yerinde delik meydana gelirken, iletkenlik bandında elektron oranı artar. Bu durum iletken malzemelerde gözlemlenirken yarıiletken malzemelerde ise bu duruma karşı bir durum gözlenmektedir (Moğulkoç, 2013).

Yarıiletkenler bazı durumlarda elektriği iletirken bazı durumlarda ise elektriği iletemezler. Normal halde yalıtkan olmalarına rağmen ısı, ışık, manyetik etki gibi etmenler ile iletkenlik özelliği kazanabilirken dış etki ortadan kalktığında yalıtkan halen geri dönerler. Bu özelliği elektriksel alanlarda tercih edilmesinin önemli nedenlerinden bir tanesidir (Moğulkoç, 2013; Yarıiletkenler, 2022). İletkenlerde elektronlar iletim bandında hareket ederken yarıiletkenlerde iletim bandı ve valans bandında hareket eder. Elektronların iletim bandında hareket ettiği yarıiletkenler n-tipi, valans bandında hareket ettiği yarıiletkenler ise p-tipi olarak adlandırılmaktadır (Fotovoltaik sistem deney föyü, 2022).

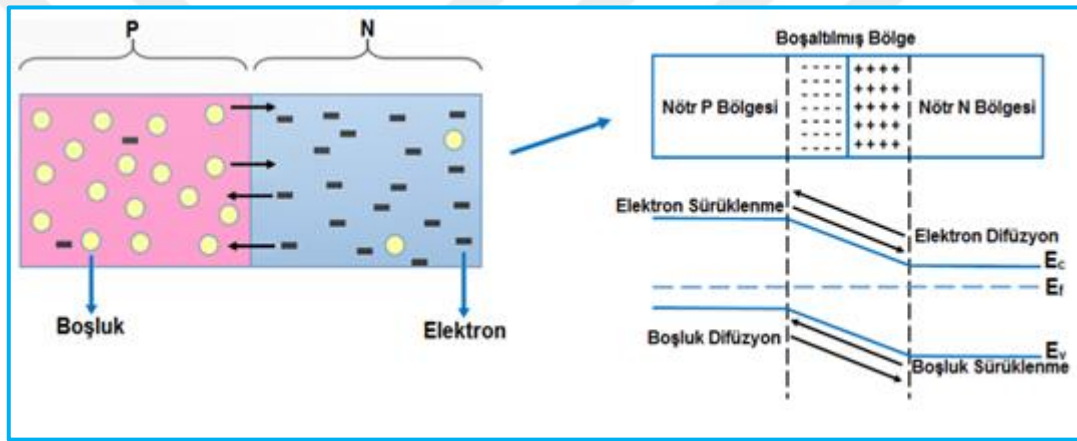
2.1. Yarıiletkenlerde Katkılama İşlemi

Saf yarıiletken içerisine eriyik halde katkı malzemelerinin katkılanması ile n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler (Şekil 13) elde edilebilmektedir (Sarılmaz, 2016). Örneğin yarıiletken özellikli Si (silisyum) veya Ge (germanyum) içerisine As (arsenik), Sb (antimon), N (azot) gibi beş valans elektronu bulunan elementlerle katkıldığında n-tipi Si veya Ge elde edilir. Ge ile Sb katkılama yapıldığında Sb'nin beş valans elektronundan dördü Ge'nin dört valans elektronu arasında kovalent bağ oluşur (Şekil 13a). Sb'nin geriye kalan son valans elektronu ise bağ yapamaz ve bu elektron iyonlaşarak kristal içerisinde serbestçe hareket eder. Böylece elektron fazlalığı oluşarak n-tipi özellikli yarıiletken meydana gelmektedir.



Şekil 13. Yarıiletkenler; a) n-tipi germanyum, b) p-tipi germanyum

Benzer şekilde Si veya Ge yarıiletken içerisine B (bor), Al (alüminyum) gibi üç valans elektronu bulunan elementlerle katkılандığında p-tipi özellikli Si veya Ge elde edilmektedir. Ge ile B katkılama yapıldığında B'nin üç valans elektronu Ge'nin üç valans elektronu arasında kovalent bağ oluşur (Şekil 13b). Ge'nin geriye kalan son elektronu ise bağın tamamlanması için B'ye geçer. Böylece Ge'nin içerisinde elektronun ayrıldığı bölümde pozitif yüklü boşluklar (delik) oluşmaktadır. Bu durumda yarıiletken içerisinde elektron eksikliği oluşur ve p-tipi yarıiletken meydana gelir (Küpeli, 2005). Elektron fazlalığı bulunan yarıiletken (n-tipi) ile boşluk fazlalığı bulunan yarıiletken (p-tipi) birleştirildiğinde Şekil 14'te gösterilen p-n eklem oluşmaktadır (Sarılmaz, 2016).

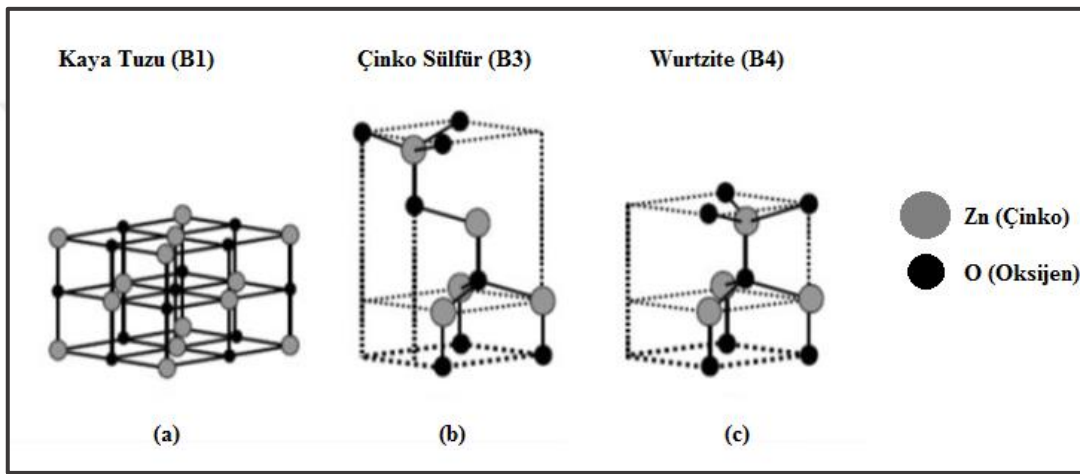


Şekil 14. p-n eklem

P-tipi ile n-tipi yarıiletkenler bir araya geldiğinde; n-tipindeki fazla elektronlar p-tipindeki boşluklara doğru hareket ederken, p-tipindeki boşluklar da n-tipine doğru hareket etmeye başlar (Şekil 14). Yani difüzyon olayı meydana gelir. Elektronların ayrılması ile n-tipi yarıiletkende hareketsiz pozitif yükler kalırken boşlukların ayrılmasıyla p-tipi yarıiletkende hareketsiz negatif yükler kalır. Oluşan yükler eklem içerisinde elektrik alan meydana getirir. Bununla birlikte oluşan elektrik alan difüzyon akımının tersi yönünde bir sürüklenme akımı oluşturur. Böylece yük dengesi oluşur ve eklemde boşaltılmış bölge olarak isimlendirilen nötr bir bölge oluşturur. Denge oluştuğunda hareket durur ve eklemde elektrik alan oluşur. (Al, 2010).

2.2. Çinko Oksit Yarıiletkenlerin Özellikleri

Çinko oksitler (ZnO), doğada zincite minerali olarak bulunmasına rağmen genellikle sentetik olarak üretilmektedir. Periyodik tablonun II. grup elementi çinko (Zn) ve VI. grup elementi oksijenden (O) oluşan bileşik yarıiletkenlerdir. ZnO'nun Şekil 15'te gösterildiği gibi B1 (kaya tuzu), B3 (çinko-blend) ve B4 (wurtzite) olmak üzere üç kristal fazı bulunmaktadır (Aktürk, 2013). Normal şartlardaki kararlı fazı wurtzite simetrisindedir. Ancak yüksek basınç altında kaya tuzu (NaCl) yapıda veya kübik kristal alttaşılar üzerinde çinko-blend yapıda elde edilebilmektedir.



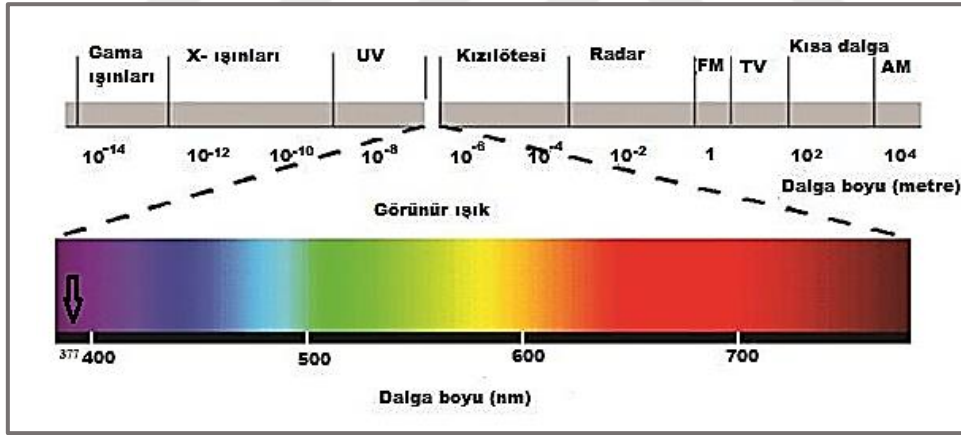
Şekil 15. ZnO'nun; a) B1 (kaya tuzu), b) B3 (çinko sülfür) ve c) B4 (wurtzite) kristal yapısı

ZnO'nun wurtzite fazı hegzogonal simetride yüksek yüzey enerjisi ve gelişmiş yüzey yük yoğunluğu özellikleri sergilemektedir. Wurtzite örgüsünde kristallenmiş olan ZnO'nun özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Örgü sabitleri $a = b = 3,24 \text{ Å}$ ve $c = 5,19 \text{ Å}$ 'dır. Yasak enerji band aralığı ise yaklaşık 3.2 eV 'dur. Bu enerji aralığı 377 nm dalga boyunu ifade eder ve elektromanyetik spektrumda Şekil 16'da gösterildiği gibi mor ışığa denk gelmektedir (Algün, 2018). ZnO şeffaf yarıiletken özellikli oksit bir materyaldir. ZnO görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahip ($\sim 80\%-90\%$ optik geçirgenlik) ve $10^{-3}-10^2 \text{ Ωcm}$ arasında elektriksel direnç sahiptir. Bu gibi özellikler güneş hücrelerinde kullanımı gibi birçok alanda tercih edilmesine neden olmuştur (Aksoy, 2006). Katkısız ZnO n-tipi yarıiletkenlik gösterir, buna neden olarak örgüdeki oksijen miktarındaki azlık veya stokiyoimetrideki sapmalar gösterilmektedir.

Tablo 2. ZnO wurtzite kristal sistemine ait birim hücre parametreleri

Kristal Yapısı (Faz)	Wurtzite (Hekzagonal)
Yasak Enerji Aralığı	Doğrudan, 300 K' de $\sim 3,2$ eV
Örgü Sabitleri	$a = 3,24 \text{ Å}$, $b = 3,24 \text{ Å}$, $c = 5,19 \text{ Å}$ $c/a = 1,6$
Etkin Kütle	$m_e^* = 0,3 m_0$ $m_b^* = 1,8 m_0$
Dielektrik Sabiti	8,5
Dalga Boyu	$\sim 377 \text{ nm}$
Yoğunluk	$5,61 \text{ g/cm}^3$

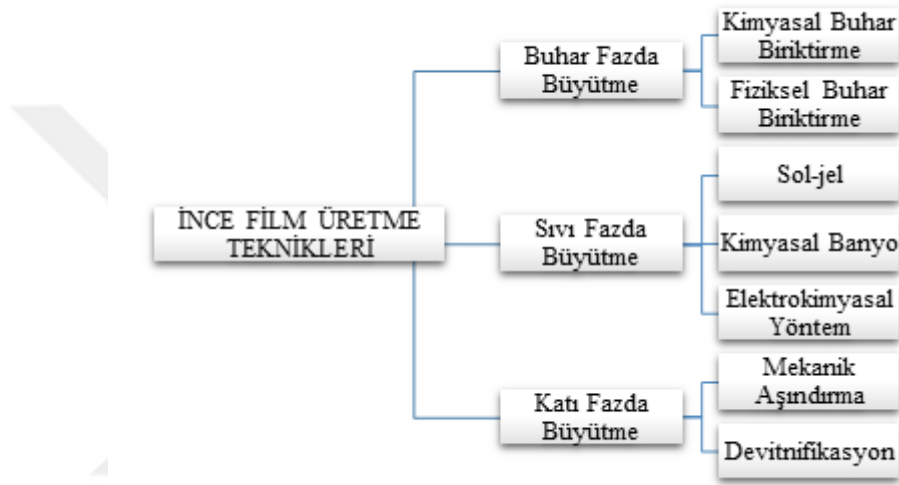
ZnO'ya periyodik tablonun III. grup elementleri (Al, B, Ga vs.) ve IV. grup elementleri (Br, F, I vs.) katkılanarak n-tipi özellikli ZnO elde edilir. Bu elementlerin son yörüngesindeki elektronlar örgüdeki oksijen atomlarına yerleşir ve elektron fazlalığı meydana getirirler. Böylece n-tipi iletkenlik meydana gelmiş olur. ZnO'nun p-tipi katkılanması günümüzde halen zordur. Bunun nedeni çinko atomlarının oluşturduğu kusurların ve örgüdeki oksijen boşluklarının varlığının n-tipi iletkenliğe yol açmasıdır (Algün, 2018).



Şekil 16. Elektromanyetik spektrum

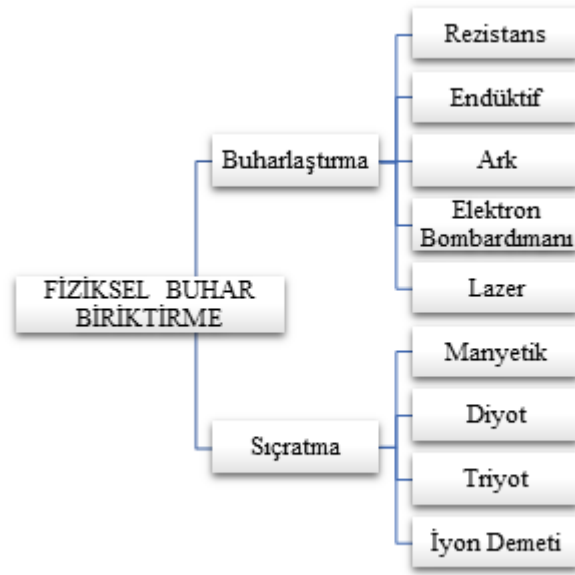
3. İNCE FİLM ÜRETME TEKNİKLERİ

İnce filmler boyutları nanometre ile mikrometre arasında değişen katman malzemelerin oluşturduğu yapıdır. Film kalınlığı 1 μm veya daha düşük boyutlardaki filmler ince film olarak kabul edilir. Fakat pratik uygulamalarda filmin kalınlığı 0,01 μm (1 Å) ile 10 μm aralığında değişmektedir. İnce filmler temel olarak katı sıvı ve gaz fazda büyütülmektedir. Şekil 17’de gösterildiği gibi birçok ince film üretim tekniği bulunmaktadır (Sönmezoğlu vd., 2012).



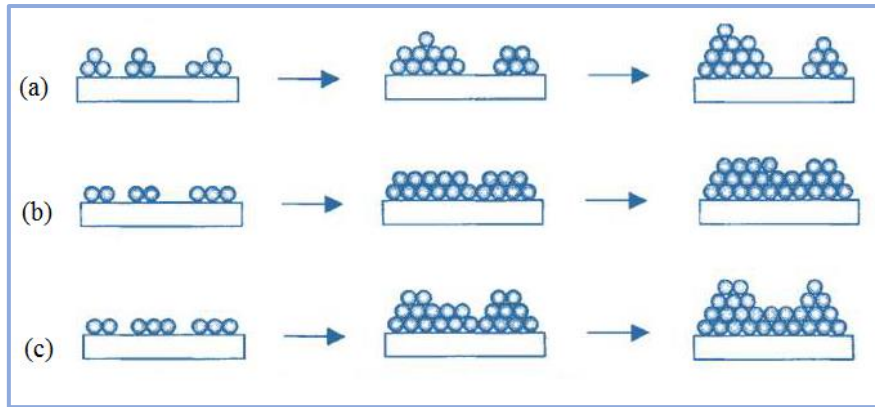
Şekil 17. İnce film üretme teknikleri

Kaliteli ince film üretimi vakum ortamında gerçekleştirilir. Vakum ortamında gerçekleşen fiziksel buhar biriktirme yöntemi (FBB), en eski ve en fazla kullanılan yöntemdir. Fiziksel buhar biriktirme terimi ilk kez 1966 yılında C.F. Powell’ in “Buhar Biriktirme” adlı kitabında kullanılmasına rağmen aslında 1938 yılında Michael Faraday’ın yapmış olduğu çalışmalara kadar uzanmaktadır. Fiziksel buhar biriktirme ile kaplama 19. yüzyıldan beri bilinen bir teknolojidir. Fakat önemi yarıiletken endüstrisinin gelişmesi ile artmıştır. FBB tekniği geçmişten günümüze birçok alanda (mikro-elektronik, tıp vs.) kullanılmaktadır. FBB kaplama yöntemi Şekil 18’de gösterildiği gibi buharlaştırma ve sıçratma olarak iki grupta incelenmektedir (Sönmezoğlu vd., 2012). Bu yöntem vakum içerisinde katı veya sıvı fazdaki malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atom yüzeylerinden koparılması ve kaplama yapılacak alttaş malzemesinin yüzeyinde biriktirilmesi ilkesine dayanır.



Şekil 18. Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri

İnce filmlerin büyütülmesi, büyütülecek yüzey veya alttaş yüzeyinde oluşan büyüme ve çekirdeklenme aşaması olarak tanımlanır. Filmin sahip olduğu kristal yapının belirlenmesi için çekirdeklenme süreci önemli bir rol oynamaktadır. Gibbs serbest enerjisi miktarı alttaş üzerinde gerçekleşen büyümenin temelini oluşturur. Film ve alttaş arasındaki etkileşim başlangıç çekirdeklenmesinin ve filmin büyümesini belirler.



Şekil 19. Çekirdeklenme modelleri **a)** adacık büyümesi, **b)** katman büyümesi, **c)** adacık-katman büyümesi

Temel olarak üç çekirdeklenme modeli bulunmaktadır. Bunlar Şekil 19a'da gösterilen adacık (Volmer Weber) büyümesi, Şekil 19b'de gösterilen katman (Frank-von der Merwe) büyümesi ve Şekil 19c'de gösterilen adacık-katman (Stranski-Krastonov) büyümesidir (Yüzüak, 2016). Büyütülen yüzeyde atomların kendi aralarında yaptıkları bağ, alttaş ile yaptıkları bağdan kuvvetli ise adacık büyümesi oluşmaktadır. Eğer bu durumun tersi olan atomların arasındaki bağların zayıf ve atom-alttaş arasındaki bağların kuvvetli olduğu durumda katman büyümesi oluşmaktadır. Orta seviyede adacık katman büyümelerinin karışımı ise adacık-katman büyümesini oluşturmaktadır. İnce filmlerin yapısına, elektriksel ve manyetik özelliklerine ince film üretme sürecinin etkisi büyüktür. Filmlerin yapılarını ve özelliklerini değiştirmek için süreç içerisinde bazı değişkenler bulunmaktadır. Bunlar; alttaş sıcaklığı, hedef-alttaş arasındaki uzaklık, sıçratma basıncı ve sıçratma gücü olarak tanımlanmaktadır (Yüzüak, 2016). Sıçratma basıncı temelde iyonlaşmış soy gaz atomlarının hedef yüzeyindeki atomlara çarpmasını ve buna bağlı olarak yüzeyden atomların kopmasını ve alttaşa yönlendirilmesini sağlamaktadır. Eğer sistem için gerekli basınçtan daha düşük veya yüksek basınçta sıçratma gerçekleştirilirse düzgün bir yüzey oluşturulamamaktadır. Bundan dolayı sıçratma basıncı, filmlerin büyüme yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Hedef-alttaş arasındaki uzaklıkta ince filmlerin büyütülmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Uzaklık artırıldığında veya azaldığında hedef atomlarının hareketliliği değişmektedir. Ayrıca bu mesafe biriktirilen ince filmin büyüme hızına ve tanecik boyutuna da etki etmektedir. Büyüme hızının yavaşlığı tanecik boyutlarını küçültürken büyüme hızının artışı tanecik boyutunun büyümesine neden olmaktadır. Sıçratma gücü, sıçratma sırasında tıpkı sıçratma basıncı gibi bir rol oynamaktadır. Düşük sıçratma güçleri, yüzeyde bir çekme gerilimi oluşmasına sebep olmaktadır. Böylece, yüzeyde parçacıklar ile birlikte yüzeyin hareketliliği de artmaktadır. Sıçratma gücünün artırılması, büyüme işleminin sonucunda ince filmde kusurlar meydana getirebilir. Filmlerin istenilen özelliklerde alttaş üzerinde büyüebilmesi ve alttaş üzerine düşen atomların birbirine bağlayacak enerjiye sahip olabilmeleri için alttaşların ısıtılması gerekebilmektedir. Böylece istenilen yapıda ince film üretilebilmektedir (Yüzüak, 2016).

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

ZnO ince filmlerin farklı yöntemlerle büyütülmesi, elektronik cihazlarda kullanımı vb. uygulamalar bilim insanlarının dikkatini çeken araştırma konularından bir tanesidir. Bu bölümde ZnO ince filmler ve TENJ ilgili literatürde daha önce yapılan bazı çalışmalar incelenerek yıllara göre elde edilen çıkış verileri listelenmiştir.

1984 yılında Petrov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada iki farklı sistem ile (manyetik alanda sıçratma ve geleneksel diyet) ZnO ince filmleri DC sıçratma yöntemiyle üretmişlerdir. Manyetik alanda sıçratma sistemi ile yaklaşık 0,4 Pa düşük basınçta yüksek yapısal gerilime sahip filmler elde edilmiştir. 4 ile 7 Pa arasında yüksek basınçlara çıkıldığında ise gerilimin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca filmler büyütüldükten sonra tavlanmış ve gerilim ortadan kalkarak daha yüksek kaliteli filmler üretilmiştir. Geleneksel diyet sisteminde film yapısının gaz karışımındaki oksijen değerine (alt taban paralel konumdayken) bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Petrov vd., 1984).

1998 yılında Studenikin ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada farklı alttaş sıcaklıklarında çinko nitrat çözeltisi ile püskürtme metodu kullanarak ZnO ince filmler üretmişlerdir. Çalışmalarında filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin yanında üretim sıcaklığının yapı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. 180 °C'yi kritik sıcaklık olarak belirlemişlerdir. 180 °C üzerinde üretilen ZnO'nun c yöneliminde polikristal olduğu görülürken bu sıcaklığın altında üretildiğinde filmin üretilmediğini ve ZnO'nun toz halinde kaldığını belirlemişlerdir. Tavlanan filmlerin band aralığının 3,30 eV olduğunu belirlemişlerdir (Studenikin vd., 1998).

Yoshino ve arkadaşları 2000 yılında radyo frekans (RF) sıçratma metoduyla ZnO ince filmleri cam, altın (Au), alüminyum (Al) ve R kesim safir alttaşlarda üretmişlerdir. ZnO'nun mikro yapısını geçirimli elektron mikroskopunu (TEM) kullanarak incelemişlerdir. ZnO/cam ve ZnO/Al yüzeyinde amorf bir tabaka oluşurken ZnO/Au ve ZnO/safir yüzeyinde ise amorf tabaka oluşmadığı ve iki yüzeyde ZnO ince film yöneliminin başladığını gözlemlemişlerdir. ZnO ince filmlerin alttaş tabanının yüzey yapısından ve kristalliğinden etkilendiğini belirlemişlerdir (Yoshino vd., 2000).

Czternastek 2004 yılında ZnO ince filmleri Al katkılı ve katkısız olmak üzere DC manyetik alanda sıçratma sistemi ile cam alttaş kullanarak üretmiştir. Büyütme

esnasında basınç ve katkılama seviyesinin optik-elektronik özelliklere etkisi incelenmiştir. Katkı seviyesinin artması ile tercihli yönelimin azaldığı, taşıyıcı konsantrasyonun ise az miktarlarda arttığı ancak elektron boşlukları (hall) hareketliliğinin ciddi miktarda azaldığı gözlemlenmiştir (Czternastek, 2004).

Zhang ve arkadaşları 2005 yılında ZnO yarıiletkenin ZnO p-n homoelektrik yapısı ve p-tipi katkılanmasının zorluğu ile ilgili bir çalışma gerçekleştirdiler. Ultrasonik püskürtme piroliz tekniği ile hazırlanan filmler azot ve alüminyum ile katkılamışlardır. Sonuç olarak katkılanan ZnO ince filmlerin çok iyi p-tipi iletim ve ultraviyole yayılımı karakteristiği gösterdiği gözlemlenmiştir. Daha sonra katkılı ve katkısız ZnO tabakası ile oluşturulan p-n eklem ile I-V karakteristiğinden 2,5 V gerilim elde etmişlerdir (Zhang vd., 2005).

Şenadım ve arkadaşları 2016 yılında ZnO ince filmleri oda sıcaklığında vakum ark yöntemiyle cam alttaşı üzerine üretmişlerdir. X-ışın kırınımı yöntemiyle filmlerin yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Ölçüm sonucunda filmlerin wurtzite (002) yönünde olduğunu göstermişlerdir. Tanecik büyüklüğünü yaklaşık olarak 19 ile 42 nm arasında hesaplamışlardır. Isıl işlem ile birlikte kristal yapının daha iyiye gittiğini ve 600 °C ısıtma işlemi ile bir film diğer filmlere göre daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. 600 °C cam alttaşı için ölçebildikleri en yüksek değerdir. Isıl işlem ile birlikte filmlerin soğurma katsayısı ve band aralığının artarken kırılma indislerinin azaldığını belirlemişlerdir (Şenadım vd., 2006).

Huang ve arkadaşları 2008 yılında bakır (Cu) katkılı ZnO yapısının kusur yük durumunun manyetikliğe etkisini araştırmışlardır. P-tipi ZnO-Cu yapısının ferromanyetik özelliğinin olmasına rağmen n-tipi ZnO-Cu'nun manyetik momentinin olmadığını keşfettiler (Huang vd., 2008).

Jeong ve arkadaşları 2011 yılında p-tipi iletkenlik elde etmek için Pt kontak elektrotlu ZnO nano tel alan etkili transistör ürettir. Pt yüksek iş fonksiyonuna sahip olup kimyasal olarak inerttir. Çalışmada zayıf bir p-tipi iletim elde ettiler. ZnO nano tel ile Pt arasında oluşan yüksek Schottky engeli ile birlikte akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal davranış göstermediğini görülmüştür (Jeong vd., 2011).

2012 yılında Zhu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada triboelektrik malzeme olarak poliimid, PMMA (polimetil metakrilat) elektrot olarak ise alüminyum

kullanılan TENJ üretmişlerdir. Dikey temas ayrılma modu ile çalıştırdıkları TENJ'den ~ 110 V gerilim ve $\sim 31,2$ mW/cm² güç elde etmişlerdir (Zhu vd., 2012).

2012 yılında Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada triboelektrik malzeme olarak poliimid ve PDMS (Polidimetilsiloksan) elektrot olarak ise alüminyum kullanarak TENJ üretmişlerdir. Dikey temas ayrılma modu ile çalıştırdıkları TENJ'den ~ 230 V gerilim ve ~ 128 mW/cm³ güç elde etmişlerdir (Wang vd., 2012).

Lee, Chen ve arkadaşları 2012 yılında hibrit-fiber nano jeneratör ürettirler. ZnO nano tel içeren ~ 2 cm uzunluğundaki hibrit fiber cihazı insan koluna takarak kolun 90°'lik açma-kapama hareketi sırasında $\sim 0,1$ V gerilim, 10 nA/cm² akım yoğunluğu ve 16 μ W/cm³ güç elde ettiler (Lee vd., 2012).

Zhu ve arkadaşları 2013 yılında ayakkabı tabanına ve yer karosuna uygulanabilen dikey temas modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak PDMS alt malzeme olarak ise PMMA kullanmışlardır. TENJ'den maksimum 2 mA kısa devre akımı elde etmişlerdir. Bu cihaz düzeyinde $\sim 1,2$ W anlık güç çıkışı, ~ 313 W/m² güç yoğunluğu, ~ 132 mW ortalama güç çıkışı, ~ 1200 V açık devre voltajı ve %9,8 enerji dönüştürme verimliliği sağlamışlardır (Zhu vd., 2013).

Bai ve arkadaşları 2013 yılında ayakkabı iç tabanına uygulanabilen dikey temas modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak PTFE, alüminyum alttaş olarak poliimid, elektrot olarak ise alüminyum kullanmışlardır. Küçük boyutlu (3,8 cm, 3,8 cm, 0,95 cm) ve son derece hafif (7 g) TENJ'den $\sim 0,66$ mA akım, ~ 215 V gerilim ve $\sim 9,8$ mW/cm² anlık maksimum güç yoğunluğu elde etmişlerdir (Bai vd., 2013).

2013 yılında Wang ve arkadaşları düzlem içi kayar mod ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak naylon 6.6, PTFE elektrot olarak metal kullanmışlardır. TENJ'den ~ 1300 V açık devre gerilimi, $\sim 4,1$ mA/m² kısa devre akım yoğunluğu ve $\sim 5,3$ W/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir (Wang vd., 2013).

2013 yılında Yang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dokunmatik yüzeylere uygulanabilen tek elektrot modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak insan teni, PDMS ve elektrot olarak ITO kullanılmıştır. TENJ'den, 100 M Ω yükte ~ 1000 V açık devre voltajı, 8 mA/m² kısa devre akım yoğunluğu ve 500 mW/m² güç yoğunluğu güç elde etmişlerdir (Yang vd., 2013c).

2014 yılında Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ayakkabı tabanına uygulanabilen dikey temas modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak PVDF elektrot olarak iletken kumaş kullanmışlardır. TENJ'den $\sim 45 \mu\text{A}$ akım, $\sim 210 \text{ V}$ gerilim ve $\sim 2,1 \text{ mW}$ güç elde etmişlerdir (Huang vd., 2014).

2014 yılında Zhu, Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada serbest triboelektrik katman modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak bakır elektrot olarak ise altın florlu etilen propilen (FEP) kullanılmıştır. TENJ'den, $\sim 850 \text{ V}$ gerilim ve $\sim 19 \text{ mW/cm}^2$ güç yoğunluğu elde etmişlerdir (Zhu vd., 2014).

2014 yılında Ko ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dikey olarak hizalanmış ZnO nanoçubukları, elektrokimyasal biriktirme yöntemiyle ITO/PET üzerinde sentezlemişlerdir. ITO-PET ile kombinledikleri ZnO nanoçubukları PDMS tabanlı triboelektrik nanogeneratörün üst elektrotu için kullanmışlardır. ITO/PET üzerinde dikey olarak hizalanan ZnO nanoçubuklara sahip üst elektrot, geniş bir dalga boyu aralığında $0,19 \text{ s}$ 'lik kısa bir sürede $\sim 85\%$ 'lik yüksek geçirgenlik göstermiştir. TENJ'den 4 Hz itme frekansı ve $0,3 \text{ kg-F}$ kuvvet altında $\sim 3,62 \text{ V}$ gerilim ve $\sim 112,7 \text{ nA}$ akım; 1 Hz itme frekansı ve $8-10 \text{ kg-F}$ kuvvet altında ise $\sim 5,34 \text{ V}$ gerilim ve $\sim 181,4 \text{ nA}$ akım elde etmişlerdir (Ko vd., 2014).

Seung ve arkadaşları 2015 yılında giysi koluna uygulanabilen dikey temas ayrılma modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak gümüş kaplı tekstil, PDMS kaplı tekstil, ZnO ve elektrot olarak gümüş kaplı tekstil kullanmışlardır. TENJ'den $\sim 120-170 \text{ V}$ gerilim ve $\sim 1,1 \text{ mW}$ güç elde etmişlerdir (Seung vd., 2015).

2015 yılında Yue ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ZnO nanotüpler ve iletken Ag nanoteller ile kombinlenmiş esnek PDMS filmine dayalı bir nanogeneratör tasarlamışlardır. PDMS filminin yapısı, ZnO nanotüplerin yüzeyinde kaplanmış iletken Ag nanotelleri ve PDMS/Ag/ZnO/PDMS'nin yapısını oluşturan üstte kapsüllenmiş başka bir ince PDMS katmanı ile dielektrik bir PDMS filmi üzerine dağıtılmış yarıiletken ZnO nanotüplerden oluşmaktadır. Değiştirilen PDMS film ile nanogeneratörün performansını farklı ölçüm koşulları altında incelemişlerdir. TENJ'in periyodik kuvvet altındaki çıkış akım yoğunluklarını ve güç yoğunluklarını sırasıyla

20 N için 10 μA , 1,1 mW/cm^2 ve 90 N için 115 μA , 23,75 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ olarak elde etmişlerdir (Yue vd., 2015).

2016 yılında Pu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kol altına uygulanabilen serbest triboelektrik katman modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak parilen ve elektrot olarak nikel kullanmışlardır. TENJ'den $\sim 0,32 \text{ mW}/\text{cm}^2$ güç elde etmişlerdir (Pu vd., 2016).

2017 yılında Deng ve arkadaşları yaptıkları çalışma, yarıiletken ZnO kaplı triboelektrik elektrot kimyasal sentez yöntemi kullanılarak PDMS polimer üzerine ZnO baloncuklarının yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Mantık olarak sürtünmeyi arttırmak için yapılan bu farklı yöntem oldukça başarılıdır ve TENJ'in verimini arttırmıştır. Yapılan bu çalışmada 100 Hz'de elde ettikleri en yüksek çıkış gerilimi $\sim 57 \text{ V}$, en yüksek akım yoğunluğu $\sim 59 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ve en yüksek çıkış gücü $\sim 1,1 \text{ W}/\text{m}^2$ olarak bulunmuştur (Deng vd., 2017).

2017 yılında Dong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dans matına uygulanabilen tek elektrot modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak PDMS elektrot olarak paslanmaz çelik-polyester iplik kullanmışlardır. TENJ'den $\sim 0,026 \text{ mW}/\text{cm}^2$ güç elde etmişlerdir (Dong vd., 2017).

Wu ve arkadaşları 2018 yılında dikey temas modunda ve düzlem içi kayar modda çalıştırılan TENJ tasarlamışlardır. Triboelektrik malzeme olarak kâğıt peçete, PVC ve elektrot olarak gümüş nanotel kullanmışlardır. Dikey temas modu TENJ'den $\sim 17\text{-}100 \text{ V}$, düzlem içi kayar modu TENJ'den $\sim 5\text{-}19 \text{ V}$ gerilim elde etmişlerdir (Wu vd., 2018).

Ning ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları çalışmada kumaşa uygulanabilen tek elektrot mod ile çalışan TENJ tasarlamışlardır. Triboelektrik malzeme olarak PTFE elektrot olarak bakır kullanmışlardır. TENJ'den $\sim 1050 \text{ V}$ gerilim $\sim 22 \mu\text{A}$ akım elde etmişlerdir (Ning vd., 2018).

2018 yılında Jeon ve arkadaşları yaptıkları çalışmada çıkış voltajlarını artırmak için bir ZnO nano dalgacık sürtünme katmanına dayalı TENJ tasarladılar. ZnO nano dalgalarının şeklinin sürtünme katmanları arasındaki temas alanının boyutunu ve TENJ cihazlarının karşılık gelen güç üretim kapasitesini etkilediğini belirlediler. ZnO nano dalgacıklara sahip TENJ cihazını dikey temas ayırma modunda çalıştırdıklarında çıkış gerilimini 80 V üzerinde elde etmişlerdir. ZnO nano dalgacıklarına dayalı

TENJ'ler için elde ettikleri gerilim değerinin ZnO nanoçubuklara dayalı TENJ'lerden ~ %300 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir (Jeon vd., 2018a).

2018 yılında Jeon ve arkadaşları yaptıkları çalışmada TENJ'de polietilen naftalat alttaş üzerinde ZnO nano yapılı aktif katmanlar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda 20 V çıkış gerilimi ve 1,36 μA çıkış akımı elde etmişlerdir (Jeon vd., 2018b).

Chen ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları çalışmada Sb katkılı ZnO-NR/PDMS TENJ geliştirmişlerdir. Çıkış geriliminin ve akım yoğunluğunun artan Sb katkılama konsantrasyonları ile doğrusal olarak yükseldiğini ve Sb katkılı ZnO nanoçubuk (NR) dizilerini içeren TENJ'in katkısız ZnO NR dizilerinininkinden daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Katkısız ZnO NR dizilerinin çıkış gerilimi 0,5 V'dan katkılama ile 12 V'a çıkarılmıştır. Akım yoğunluğu ise $2 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 'den katkılama ile $1,1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 'ye çıkarılmıştır (Chen vd., 2018).

Xia ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada insan parmağına uygulanabilen dikey temas modu ile çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak PTFE, kâğıt, karton elektrot olarak iletken mürekkep kullanmışlardır. $2 \times 4 \text{ cm}$ boyutundaki TENJ'den ~392 V gerilim ve ~93 μA güç elde etmişlerdir. TENJ'e 10 M Ω 'lık yük bağlandığında ise ~216 V gerilim ve ~21,6 μA akım elde etmişlerdir. Yüke giden toplam güç ve güç yoğunluğunu sırasıyla 4,67 mW ve 583,75 $\mu\text{W/cm}^2$ olarak hesaplamışlardır (Xia vd., 2019).

Song ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada bilek bandına uygulanabilen serbest triboelektrik tabaka modunda çalışan TENJ üretmişlerdir. Triboelektrik malzeme olarak poliimid, bakır elektrot olarak bakır kullanmışlardır. TENJ'den ~305 V gerilim ve ~0,3 mW güç elde etmişlerdir (Song vd., 2019).

Li ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada sırasıyla pozitif ve negatif sürtünme katmanları olarak görev yapan ZnO film ve poliimid (PI) kullanarak bir TENJ üretmişlerdir. Çalışma sonucunda TENJ'den 105 V gerilim ve 2,85 $\mu\text{A/cm}^2$ akım yoğunluğu elde etmişlerdir (Li vd., 2020).

Jeon ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada Al elektrot, poliimid dielektrik katman, ZnO dielektrik katman ve indiyum kalay oksit (ITO) elektrottan oluşan TENJ üretmişlerdir. Çalışma sonucunda 98,4 V gerilim ve 8,33 μA akım elde etmişlerdir (Jeon vd., 2020).

Tantraviwat ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada triboelektrik nanogeneratörlerin güç üreten performansını artırmak için geniş yüzey alanına sahip gözenekli polidimetilsiloksan geliştirmişler. Ürettikleri 100 cm²'lik bir alana sahip gözenekli PDMS tabanlı TENJ'den maksimum 3200 V gerilim ve 94 µA akım elde etmişlerdir. Ayrıca, 10 MΩ yük direncinde 0,58 Wm⁻² maksimum güç yoğunluğu sağlayarak, mikro sütunlu ve düz PDMS yüzeyli TENJ'lere kıyasla neredeyse üç kat güç iyileştirmesi sağlamıştır. Çalışmalarında güç üreten performansın artmasını artan yüzey pürüzlülüğüne ve iç gözeneklerin yüzeylerinde indüklenen ek triboelektrik yüklere bağlı olduğunu saptamışlardır (Tantraviwat ve diğ., 2020).

Gupta ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada TENJ cihazları için ZnO-Nanorod (ND) ve ZnO-Polistiren (ZnO-PS) kompoziti önermişlerdir. ITO ile kombinledikleri kompozitleri kullanarak TENJ'den 7 V gerilim ve 0,99 nA akım elde etmişlerdir (Gupta vd., 2020).

Dos Santos ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada yapısı PET/ZnO+PDMS'den oluşan TENJ tasarlamışlardır. TENJ'den 3,5 V gerilim elde etmişlerdir (Dos Santos vd., 2021).

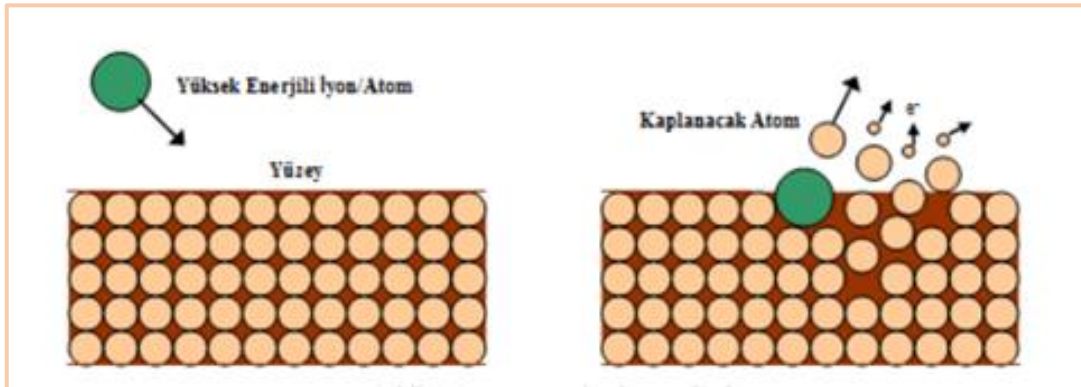
Supraja ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada triboelektrik malzeme olarak PET/ZnO nano tabakalar kullanılarak TENJ tasarlamışlardır. Çalışma sonucunda 4,5 V gerilim ve 10 µA akım elde etmişlerdir (Supraja vd., 2021).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Hazırlanan tezde triboelektrik etki prensibi ile çalışan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan TENJ üretilmiştir. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile Si(100) tek kristal alttaş üzerine büyütülen ZnO ince filmler TENJ içinde bakır (Cu) ve ITO-PET elektrot ile birlikte yer almıştır. Üretilen triboelektrik katmanın yapısal özellikleri ve yüzey morfolojik özellikleri; taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraktometresi (XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve X-ışını reflektometresi (XRR) ile elektriksel özellikleri ise direnç ölçüm sistemi ile ölçülmüştür.

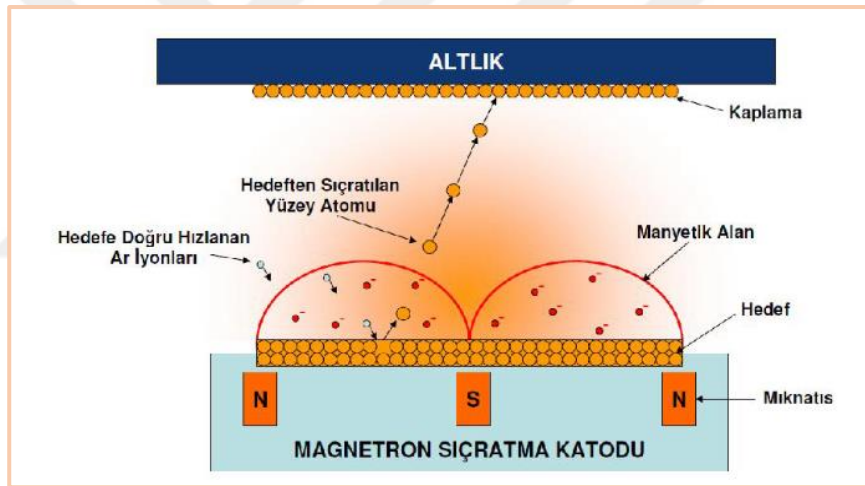
5.1. Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi ile İnce Film Üretimi

Manyetik alanda sıçratma yöntemi, ince filmlerin FBB yöntemi ile kaplanmasında kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemde soy gaz iyonları hedef yüzeyine çarptırılır ve çarpışma sonucunda oluşan enerji ile hedef atomları yüzeyden kopartılır. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile hedef yüzeyine paralel olarak yerleştirilmiş mıknatıslar manyetik alan oluşturarak hedefteki ikincil elektronları sıkıştırmaktadır ve ikincil elektronlar sürekli plazma ortamı oluşturmaktadır. Manyetik alan kaynağı hedefteki ikincil elektronları manyetik alan ile yakalayıp plazma ortamına geri kazandırılmasını sağlamaktadır. Sürekli bir plazma ortamının oluşması sıçratma için gerekli iyonların oranını artırır. Bu da alttaş yüzeyinde kaplama oluşumunu sağlamaktadır (Bilgin, 2019; Ohring, 2001). Sıçratma mekanizması Şekil 20’de gösterilmektedir (Sönmezoğlu vd., 2012).



Şekil 20. Sıçratma mekanizması

Şekil 21’de manyetik alanda sıçratma sisteminin çalışma yapısı gösterilmiştir (Çalışkan vd., 2010). İki farklı manyetik alanda sıçratma tekniği bulunmaktadır. Bunlar; doğru akım sıçratma yöntemi (DC) ve radyo frekansı (RF) sıçratma yöntemidir. Doğru akım sıçratma yönteminde düzlemsel iki elektrot (anot ve katot) bulunmaktadır. Katotun yüzeyine kaplanacak hedef malzeme, anodun yüzeyine alttaşlar yerleştirilir. Elektrotlar arasında oluşturulan dc gerilim ile plazma meydana gelir. Soy gaz iyonları hedeften atomları koparır ve alttaş yüzeyinde ince film tabakası oluşur. Radyo frekansı tekniğinde ise yalıtkan hedefte plazma oluşumu RF gerilim ile gerçekleştirilir. Kaplama işlemi için kullanılan akımın RF olması, katot yüzeyinde oluşan yüklerin 13.56 MHz frekansla işaret (+,-) değiştirmesini sağlayıp yalıtkan hedeflerin de kopartılmasını sağlamaktadır (Yüzüak, 2016).



Şekil 21. Manyetik alanda sıçratma sistemi

Tez kapsamında n-tipi yarıiletken özellikli ZnO ince filmler uygun alttaş sıcaklığında Si(100) alttaş üzerine manyetik alanda sıçratma sistemiyle üretilmiştir. Si(100) alttaşın diğer tarafına da iletken olarak bakır (Cu) kaplanmıştır. İnce filmler büyütülmeden önce silisyum alttaşların temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak saf ve deyonize su ile yıkanan alttaşlar; 10’ar dakika %20 seyreltilmiş asetik asit (CH_3COOH) çözeltisinde ve trikloretilen (C_2HCl_3) asit çözeltisinde bekletilmiştir. Sonrasında sırasıyla aseton, metanol ve saf suda 3 kez 3’er dakikalık tekrarlarla ultrasonik yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Alttaşların üzerinde biriken su

damlacıkları ise azot gazıyla (%99,99) uzaklaştırılmıştır. Son olarak alttaşların kurulama işlemi gerçekleştirilmiştir. İnce film üretimi Şekil 22’de gösterilen üniversitemizin merkezi araştırma laboratuvarında bulunan Vaksis marka ince film üretim sistemi ile gerçekleştirilmiştir. İnce film kaplama sisteminde, sistem temel basınca erişinceye kadar vakuma (3×10^{-6} Torr) alınmıştır. Çalışma odasına Argon gazı gönderilmiş ve sisteme açılan kelebek vana bir süre kapatılarak ortamın çalışma basıncı $\sim 7 \times 10^{-3}$ Torr’a gelmesi sağlanmıştır.



Şekil 22. İnce film üretim mekanizması

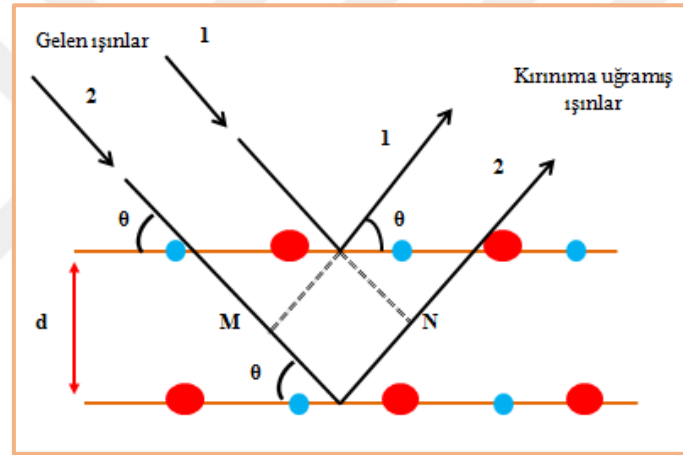
İnce filmler 40, 50, 60, 75, 100 W sıçratma güçlerinde büyütülmüştür. Uygun sıçratma gücü belirlenen ince film grubu 5, 8, 10, 12, 15 mTorr sıçratma basınçlarında tekrardan büyütülmüştür. Sıçratma gücü ve basıncı belirlenen örnekler %5, %10, %15 kısmi O₂ basınçlarında büyütülmüştür. Uygun sıçratma gücü, sıçratma basıncı ve kısmi O₂ basınçları belirlenen örnekler 5, 10, 25, 75, 100 nm kalınlıklarda tekrar büyütülmüştür. Elde edilen ince filmlerin yapısal, elektriksel ve triboelektrik katman özellikleri incelenmiştir.

5.2. Yapısal Karakterizasyon

5.2.1. X-Işını Difraktometresi (XRD)

X-ışını kırınım yöntemi (XRD), kristal yapıların özgün atomik dizilimlerine göre, X-ışınlarının karakteristik bir düzen içerisinde kırılması prensibine

dayanmaktadır. Her kristalin kırınımı farklıdır. XRD ile analiz edilen numuneler herhangi bir zarar görmemektedir. XRD ile polimer malzemelerin, kayaçların, ince filmlerin ve kristalin malzemelerin nitel ve nicel olarak yapısı incelenebilmektedir. Şekil 23'te X-ışınlarının kırınımında gelen ve kırınıma uğramış ışınları gösterilmektedir (Akman, 2013). X-ışını kırınımı Bragg yasası ile açıklanır. Paralel örgüde iki düzlem arasındaki uzaklık “d”, gelen ve yansıyan ışının düzlemle yaptığı açı “ θ ” ile gösterilmiştir. Bragg yasasına göre malzeme yüzeyine gönderilen X-ışını malzeme içindeki atomlara çarpıp kırınıma uğrayıp saçılmaktadır. Yapıcı girişim olabilmesi için düzlemden kırınıma uğrayan ışınların aldıkları yol farkı, dalga boyunun (λ) tam katı olmalıdır. Kısaca Bragg yasası denklem 22’de gösterilen formül ile açıklanmaktadır (Akman, 2013).



Şekil 23. X-ışını kırınımında gelen ve kırınıma uğramış ışınlar

$$\text{Yol Farkı} = d \sin \theta + d \sin \theta$$

(22)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

XRD analizinden yarı maksimum ve tam genişlik değerleri ölçülerek filmlerin ortalama tane boyutları denklem 23’te verilen Scherrer formülü ile belirlenmektedir. Burada; β yarı maksimum tam genişlik, λ hedefin dalga boyu ve θ kırınım açısıdır (Bilgin, 2019).

$$T = \frac{0,9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (23)$$

X-ışını kırınım desenlerinden malzemenin birim hücresinin uzunlukları, hacmi ve yoğunluğunun yanı sıra koordinatları ve atomlar arası uzaklıkları da belirlenebilmektedir. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için Rietveld analizi kullanılmaktadır. En küçük kareler yöntemi ile ölçüm sonucu elde edilen veriler ile programa girilen başlangıç değerleri birbirinden çıkartılarak sonuca yaklaşılmaya çalışılmaktadır. Rietveld analizinde gözlenen şiddet değeri ve hesaplanan şiddet değeri arasındaki farkı azaltmak için arıtılabilir farklı parametreler kullanılmaktadır. Bu analizi etkileyen parametreler taban sayımı, profil ve yapısal değişkenler olmak üzere üç grupta incelenmektedir. Bragg yansıma şiddetlerini yapısal değişkenler etkilemektedir. Cihaz ve örnekten gelen katkıları ise profil değişkenleri göstermektedir. Kırınım metreden ve örnekte oluşan şiddetler için taban sayımının “ y_i^b ” Rietveld hesabına katılması gerekmektedir. Karışım halindeki fazların “i” noktasındaki toz deseninin Bragg yansımaları için hesaplanan şiddet “ $y_i(\text{hes})$ ” denklem 24 ile ifade edilmektedir (Hewat vd., 2016).

$$y_i(\text{hes}) = S \cdot \sum_{hkl} L_{hkl} \cdot A_{hkl} \cdot P_{hkl} |F_{hkl}|^2 \varphi(2\theta_i - 2\theta_{hkl}) + y_i^b \quad (24)$$

Burada; hkl miller indisleri, S skala faktörü, A_{hkl} soğurma katsayısı, L_{hkl} Lorentz katsayısı, F_{hkl} bragg yansımasının yapı faktörü, P_{hkl} kutuplaşma katsayısı, y_i^b taban sayımı ve φ yansıma profil fonksiyonudur. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen değerler denklem 24’te yerine yazılıp, denklem 25’i en küçük yapan I_{hkl} , S, $2\theta_{hkl}$ ve U, V, W (arıtılabilir değişkenler) değerleri bulunmaktadır. Böylece XRD desenindeki yansımaların şiddet (I_K) ve konumları ($2\theta_K$) bulunmaktadır.

$$S_y = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - y_{hi})^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y_{hi})^2}{y_i} \quad (25)$$

$$w_i = \frac{1}{y_i} = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

Burada; y_i “i” adımımda gözlemlenen şiddeti, y_{hi} “i” adımımdaki hesaplanan şiddeti, w_i ağırlık fonksiyonunu, N ise X-ışınları kırınımı desenindeki veri sayısını ifade etmektedir. Arıtım tamamlandığında uyumun olup olmadığının belirlenmesi için bazı parametreler kullanılmaktadır. Bunlar yapı faktörü “ R_F ”, Bragg faktörü “ R_S ”, desen faktörü “ R_P ”, ağırlık desen faktörü “ R_{WP} ”, beklenen değer faktörü “ R_{EXP} ” ve Bragg katkısı “ χ^2 ” parametreleridir. Denklem 26, 27, 28, 29, 30 ve 31’de bu parametrelerin matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$R_F = \frac{\sum \left| (I_{hkl}^{\text{gözlenen}})^{1/2} - (I_{hkl}^{\text{hesaplanan}})^{1/2} \right|}{\sum (I_{hkl}^{\text{gözlenen}})^{1/2}} \quad (26)$$

$$R_B = \frac{\sum \left| (I_{hkl}^{\text{gözlenen}}) - (I_{hkl}^{\text{hesaplanan}}) \right|}{\sum (I_{hkl}^{\text{gözlenen}})} \quad (27)$$

$$R_P = \frac{\sum \left| (y_i^{\text{gözlenen}}) - (y_i^{\text{hesaplanan}}) \right|}{\sum (y_i^{\text{gözlenen}})} \quad (28)$$

$$R_{WP} = \left\{ \frac{\sum w_i \left((y_i^{\text{gözlenen}}) - (y_i^{\text{hesaplanan}}) \right)^2}{\sum w_i (y_i^{\text{gözlenen}})^2} \right\}^{1/2} \quad (29)$$

$$R_{EXP} = \left\{ \frac{(N - P + C)}{\sum w_i (y_i^{\text{gözlenen}})^2} \right\}^{1/2} \quad (30)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum w_i \left((y_i^{\text{gözlenen}}) - (y_i^{\text{hesaplanan}}) \right)^2}{N - P} \quad (31)$$

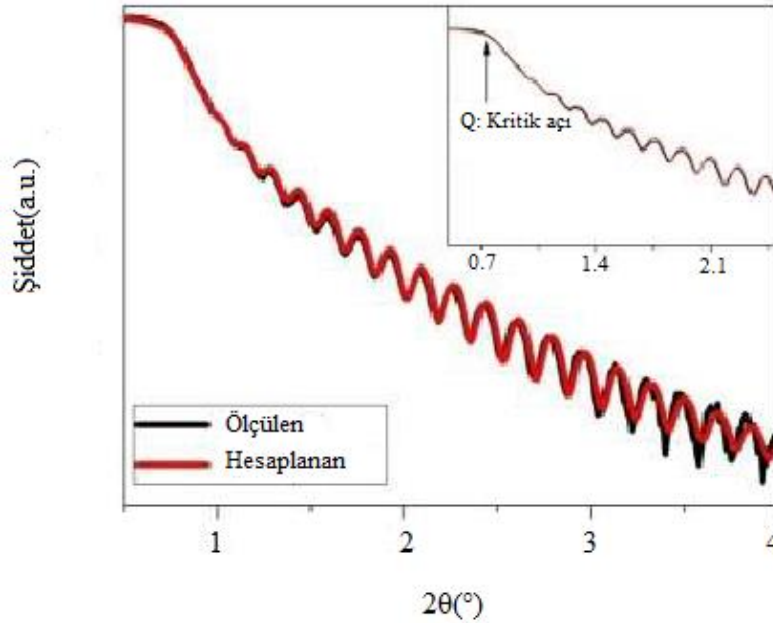
Burada; N alınan ölçüm nokta sayısını, P arıttığı parametre sayısını, C sınırlayıcı fonksiyon sayısını ifade etmektedir (Durak, 2010).

5.2.2. X-Işını Reflektometresi (XRR)

X-ışını reflektometresi ince filmlerin yoğunluğunun, kalınlıklarının ve yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. X-ışınları reflektometresi ile en fazla 200 nm kalınlığına kadar ölçüm alınabilmektedir. Düz bir yüzeyden yansıyan X-ışınının yansıma ve gelme açısı eşit olduğu anda oluşan şiddetlerin ölçülmesi temelinde çalışmaktadır. Elde edilen eğri denklem 32 ile ifade edilmektedir. Burada; λ gönderilen X-ışının dalga boyu, q_z ince film katman kalınlığı, θ gelen ve yansıyan X-ışını arasındaki açıdır (Bilgin, 2019).

$$q_z = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta \quad (32)$$

Şekil 24'te X-ışını reflektometre desenleri görülmektedir. Şekildeki ölçülen ve hesaplanan değerlerde görülen saçaklar, filmin kalınlığı hakkında bilgi vermektedir. Saçaklar arttıkça filmin kalınlığı artmaktadır. Eğrinin eğimi filmin pürüzlülüğü belirlerken yoğunluk ise başlangıç şiddetinin değişimi ile hesaplanmaktadır.



Şekil 24. X-ışını reflektometre desenleri

Yapılan tez çalışmasında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 25'te gösterilen 40 kV'luk Cu $K\alpha_{1,2}$ hedefli, Rigaku Smart Lab X-ışını kırınım metresi kullanılmıştır, Hazırlanan ince filmlerin

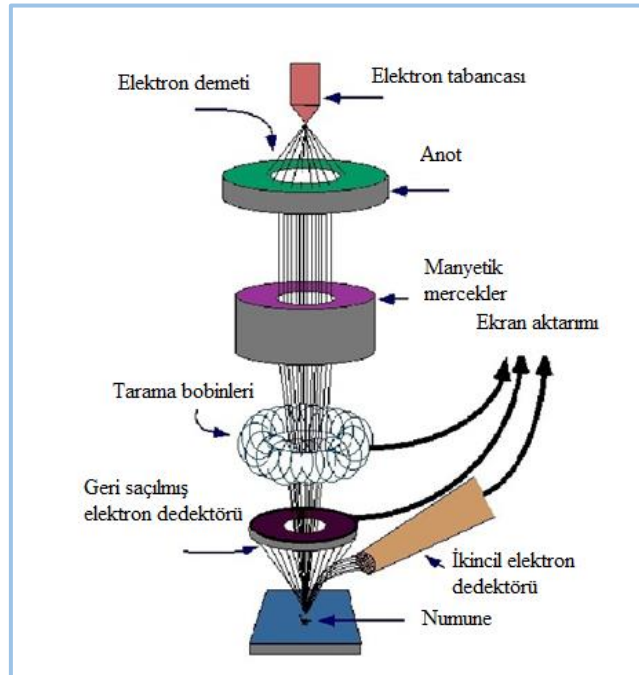
kırınım desenleri $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$ aralığında ve $\Delta 2\theta = 0,02^\circ$ derecelik adımlarla alınmıştır.



Şekil 25. X-ışını difraktometresi

5.2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazlarında geri saçılan elektronlar ve ikincil elektronlar aktif rol oynamaktadır. Şekil 26’da taramalı elektron mikroskobunun temel yapısı gösterilmektedir (SEM yapısı, 2022).



Şekil 26. Taramalı elektron mikroskobunun yapısı

SEM’de enerjisi yüksek elektronlar numune ile etkileşime girerek foton ve elektron sinyalleri oluşur. Farklı açılardan saçılan elektronlar, dedektörler tarafından toplanır. Bu dedektörler; geri saçılan elektron detektörü (BSD), ikincil elektron detektörü (SE) ve EDX dedektörüdür. Toplanan sinyaller yazılım ile işlenerek görüntüler elde edilir. İkincil elektronlar, malzeme topografisini hakkında bilgi verirken geri saçılan elektronlar atom numarasını ve kontrasta bağlı atomik kompozisyonu belirler. EDX dedektörü ile örnekte bulunan atomların %’lik oranlarını ve atomik ağırlıkları belirlenmektedir. Kısaca SEM, enerjisi yüksek elektronların malzeme ile etkileşime girmesi sonucu örnek yüzeyinden görüntü alınmasını sağlayan cihazdır (Bilgin, 2019).



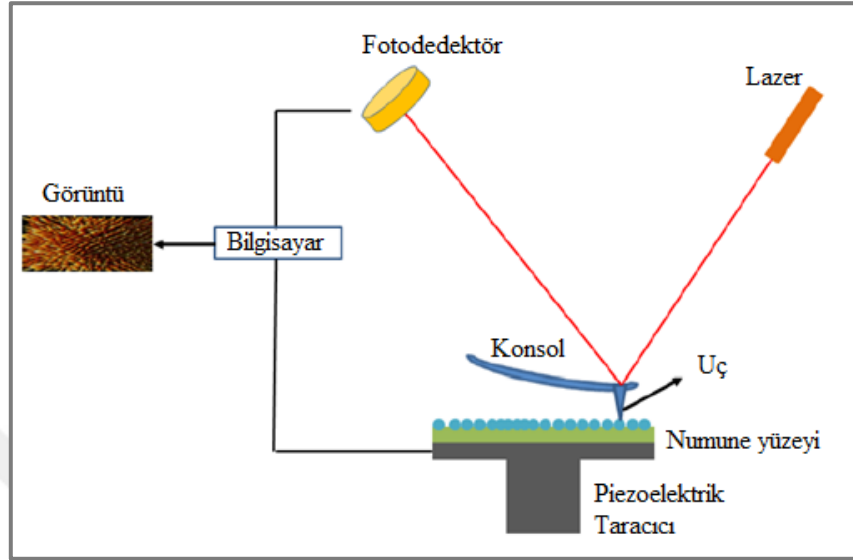
Şekil 27. Taramalı elektron mikroskobu

Tez çalışmasında SEM ölçümleri hem Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi hem de Bilkent UNAM’da alındı. Şekil 27’de RTEÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Jeol marka taramalı elektron mikroskobu gösterilmiştir.

5.2.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

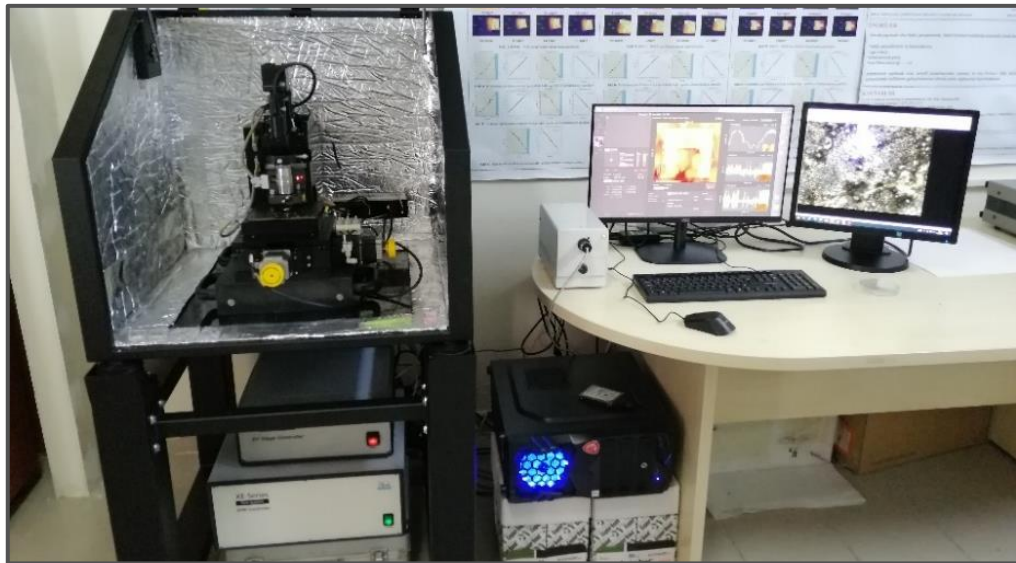
Atomik kuvvet mikroskobunda görüntü alma işlemi kuvvete bağlıdır. AFM’de bulunan tarama ucu, numune yüzeyindeki atomlarla etkileşir ve itme çekme meydana gelir. Şekil 28’de gösterildiği lazerden konsola doğru ışın gönderilir. Gönderilen ışın konsoldan yansarak fotodedektöre yönelir ve burada fark sinyalleri oluşur. Konsolun

(x, y, z yönünde) hareketi fark sinyalleri tarafından bilgisayar ekranında görüntü oluşmasına neden olur. AFM ile iki ve üç boyutlu görüntü elde edilebilmektedir (Akman, 2013).



Şekil 28. AFM çalışma mekanizması

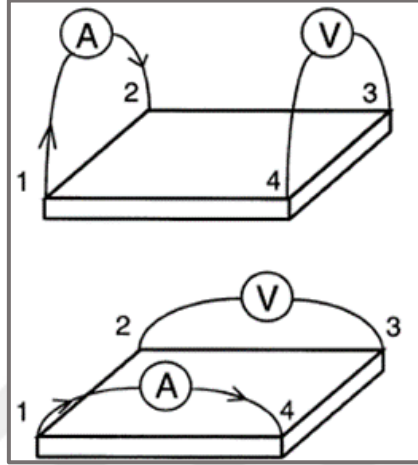
Tez çalışmasında AFM görüntüleri hem Bilkent UNAM’da hem de Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesinde alındı. Şekil 29’da gösterilen RTEÜ Fonsiyonel Malzeme Araştırma Laboratuvarında bulunan Park XE-100 model AFM cihazı gösterilmiştir.



Şekil 29. Atomik kuvvet mikroskobu

5.3. Elektriksel Ölçüm

Üretilen ZnO yarıiletken ince filmlerin Van der Pauw tekniği ile direnç ölçümü yapılmıştır. Bu teknik ilk olarak 1958 yılında rastgele biçimdeki malzemelerin Hall etkisi ve öz direncinin ölçülmesi için Leo J. Van der Pauw tarafından bulunmuştur (Van der Pauw, 1958).



Şekil 30. Van der Pauw yöntemi

Örnek malzeme bu yöntemde homojen kabul edilmektedir (kalınlık ve yapısal olarak). Şekil 30’da Van der Pauw yöntemi şematik olarak gösterilmiştir (Van der Pauw, 1958). Malzeme köşelerine yerleştirilen 4 adet elektriksel kontak kullanılarak yüzey direnci ve öz direnç belirlenmektedir. Bu yöntemde yan yana olan iki kontak arasına akım uygulanarak karşılıklı bulunan iki kontakın üzerinde oluşan gerilim farkı ölçülmektedir. Literatürde kontak isimleri farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada kontaklar Şekil 30’da gösterildiği gibi saat yönünde 1-2, 3-4 olarak numaralandırılmıştır. Ölçülen gerilimin pozitif olması için ölçümler akım yönü değiştirilerek tekrarlanmaktadır. Böylece direnç ölçümü 8 kere yapılmış olur ($R_{21,34}$, $R_{12,43}$, $R_{43,12}$, $R_{34,21}$, $R_{32,41}$, $R_{23,14}$, $R_{14,23}$, $R_{41,32}$). Bu kontakların 8 direnç ölçümünün yapısı ve aralarındaki bağlantı denklem 33, denklem 34, denklem 35 ve denklem 36’da verilmiştir (Güngör vd., 2022).

$$R_{21,34} = \frac{V_{34}}{I_{21}}, R_{12,43} = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad (33)$$

$$R_{32,41} = \frac{V_{41}}{I_{32}}, R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (34)$$

$$R_{43,12} = \frac{V_{12}}{I_{43}}, R_{34,21} = \frac{V_{21}}{I_{34}} \quad (35)$$

$$R_{14,23} = \frac{V_{23}}{I_{14}}, R_{41,32} = \frac{V_{32}}{I_{41}} \quad (36)$$

Burada; R direnci, V gerilimi ve I akımı temsil etmektedir. Sonrasında bu dirençlerin ortalaması alınıp denklem 37 ve denklem 38’de gösterildiği gibi koordinat sisteminde y eksenini yönünde bulunan R_A ve x eksenini yönünde bulunan R_B direnç değerleri hesaplanmaktadır.

$$R_A = (R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})/4 \quad (37)$$

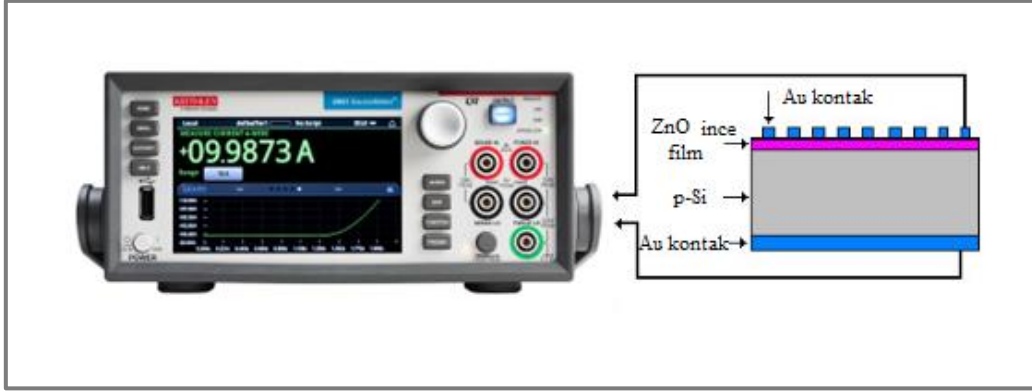
$$R_B = (R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})/4 \quad (38)$$

R_A ve R_B direnç değerleri deneysel olarak hesaplandıktan sonra denklem 39 kullanılarak yüzey direnci R_S hesaplanmaktadır. Denklem 39’u sağlayan R_S değeri bulunduğundan sonra denklem 40’da yerine yazılarak elektriksel öz direnç hesaplanabilmektedir. Burada; R_S yüzey direnci, ρ elektriksel öz direnci ve A alanı ifade etmektedir (Güngör vd., 2022).

$$\exp\left(\frac{-\pi R_A}{R_S}\right) + \exp\left(\frac{-\pi R_B}{R_S}\right) = 1 \quad (39)$$

$$R_S = \rho \frac{d}{A} \quad (40)$$

Bu çalışmada elektriksel karakterizasyon için akım-gerilim (I-V) ölçümleri Keithley 2461 kaynakmetre ile alınmıştır ve ZnO ince filmlerin ısıtma işlem öncesi ve sonrası öz direnç değerleri hesaplanmıştır. Şekil 31’de direnç ölçümü için kullanılan deney düzeneği ve Au/p-Si/ZnO/Au diyot yapısı verilmiştir. Sistemde Au (altın) kontaklar kullanılmıştır.



Şekil 31. Au/p-Si/ZnO/Au diyotların I-V ölçüm düzeneği

5.4. Isıl İşlem

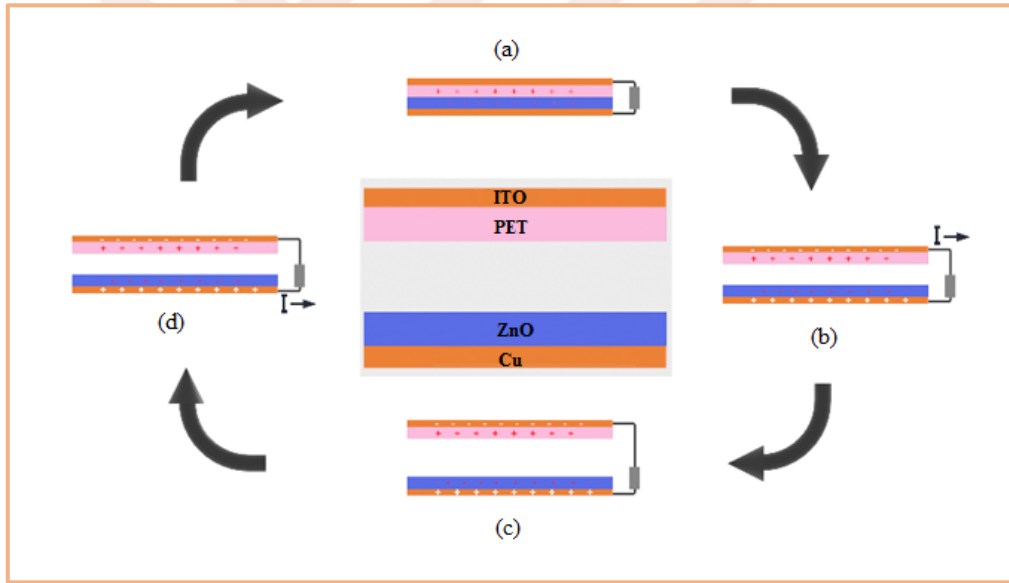
Üretilen ince filmlerin kristal yapıda olması gerekmektedir. Bu nedenle uygun ısıtım sıcaklıkları değiştirilerek filmlere uygulanmıştır. Filmlere 1'er saat 400 °C, 500 °C, 600 °C ve 700 °C ısıtım uygulanmıştır. Tez çalışmasında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi FMAG (Fonksiyonel Malzemeler Araştırma Grubu) laboratuvarında bulunan Şekil 32'de gösterilen 10^{-5} mbar vakum atmosferinde veya Ar ya da N atmosferlerinde sinterleme gerçekleştirebilen sistem kullanılmıştır. Buradaki vakum değerini elde edebilmek için Pfeiffer marka HiCube vakum istasyonu (turbo moleküler pompa ve diyaframlı pompa) kullanılmıştır.



Şekil 32. Vakum atmosferinde ısıtım sistemi

5.5. Triboelektrik Ölçüm

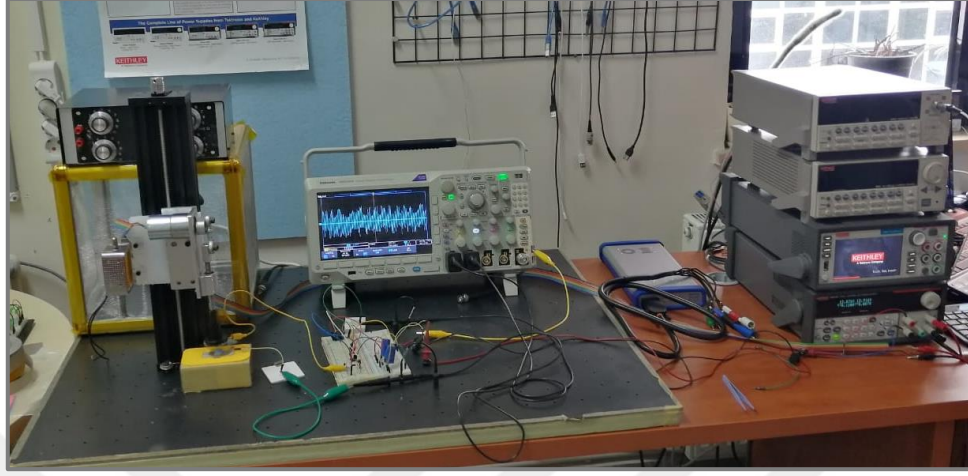
Dikey temas modu çalışma mekanizmasına bağlı olarak bu çalışmada çift katman kullanılmıştır. Bu katmanlardan biri endüstriyel olarak satın alınmış yüksek saflıkta polietilen tereftalat (PET) / indiyum kalay oksit (ITO) katman iken diğer katmanlar ise çalışmada elde edilen bir tarafı Cu ile kaplanmış ZnO ince filmidir. Şekil 33'de tez çalışmasında kullanılan dikey temas ayırma modunda çalışan TENJ'in çalışma mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 33a tam temas kısmıdır bu kısımda mekanik kuvvet ile iki plaka temas ettirilir. Bu kısımda PET ve ZnO yüzeylerinde temas elektrifikasyonu ile yükler üretilir, Şekil 33b ayrılma kısmıdır ve elektrotlar arasında elektron akışı meydana gelmektedir, Şekil 33c elektriksel denge durumudur ve TENJ tamamen serbest bırakılmıştır yani akım akışı yoktur ve Şekil 33d temas kısmıdır ve bu kısımda elektronlar ters yönde akmaktadır.



Şekil 33. Tez çalışmasında kullanılan dikey temas ayırma modunda çalışan TENJ'in çalışma mekanizması; **a)** temas, **b)** ayrılma, **c)** serbest bırakma, **d)** temas hali

Triboelektrik ölçüm mekanizmasına yerleştirilen triboelektrik katmandan tekrarlı dikey temas ayrılma hareketi ile ölçümler alınmıştır ve triboelektrik özellikleri incelenmiştir. Şekil 34'te gösterilen triboelektrik ölçüm mekanizması; Faraday Kafesi, Reciprokan hareket sağlayıcı, farklı frekanslarda çalışabilen DC motor, osiloskop,

kaynak ölçer, çıkış akımını ölçebilmek için FMAG laboratuvarında tasarlanan düşük gürültülü akım preamplifikatöründen oluşmaktadır.



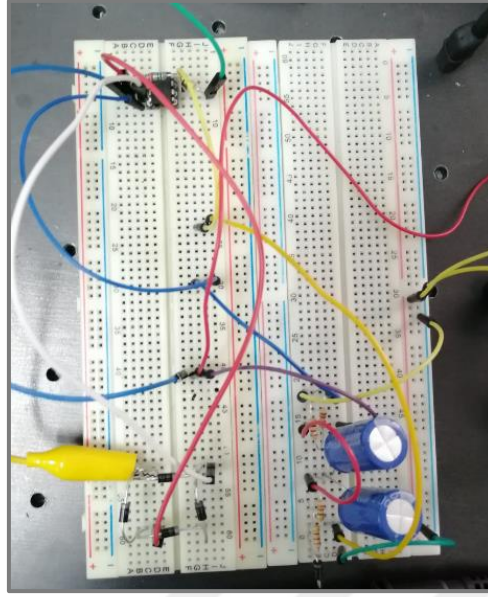
Şekil 34. Triboelektrik ölçüm mekanizması

Sistemde kullanılan Faraday kafesi gürültüyü azaltmak ve sistemin dış etkenlerden korunmak amacıyla kullanılmıştır. Reciprokan hareket sağlayıcı ise sisteme dc motor sayesinde kuvvet uygulayarak triboelektrik mekanizmasının dikey temas ayrılma modu ile çalışmasını sağlamak için kullanılmıştır. Dc motorun açısal frekans değerine göre uygulanacak kuvvet hesaplanmış ve Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Açısal frekans değerlerine göre sisteme uygulanacak kuvvetin hesabı

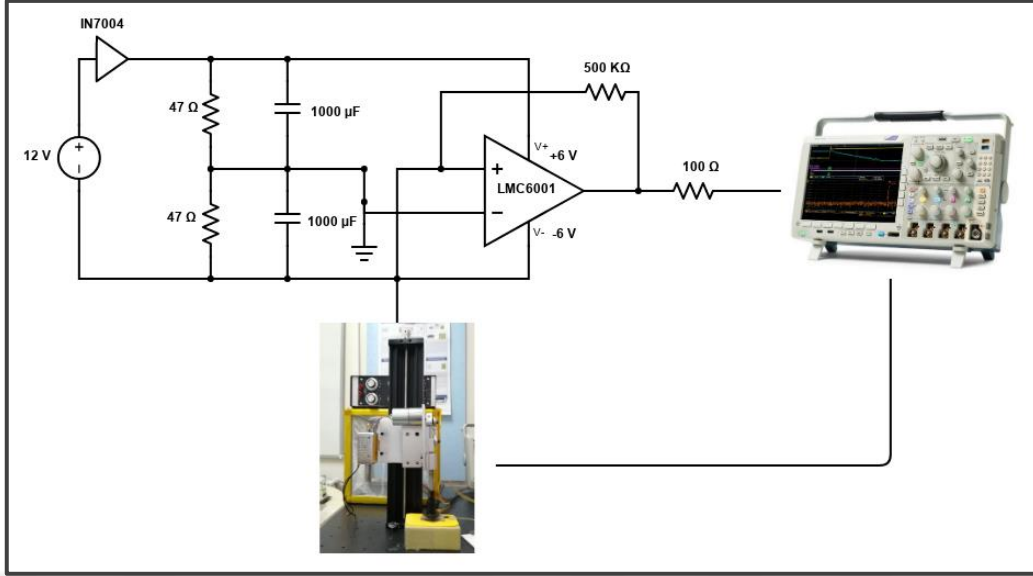
Motor dönüş hızı (rpm)	Güç (W)	Tork (N.m) ($\tau = P/d$), ($d = 10\text{ cm}$)	Kuvvet (N) ($F = \tau/d$)
10	10	1	100
30	10	3	300
50	10	5	500
100	10	10	1.000
1000	10	100	10.000

Motorun torku (τ) ile açısal frekansın (w) çarpımı güç (P) ifadesini vermektedir. Buna göre 10 rpm dönüş hızında 10 W’lık bir güç uygulandığında elde edilecek tork değeri 1 N.m’dir. Step motorun gücünü iletmek için akrilik plakaya dik olarak yerleştirilecek çubuğun uzunluğunu (d) 10 cm’dir. $\tau = F \times d$ olduğundan buradan uygulanacak olan kuvvet 100 N olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 35. TENJ'in çıkış akımını için ölçebilmek tasarlanan akım preamplifikatörü

TENJ tarafından üretilen akımın tepe değeri ve yüksek frekanslı bileşenler içerebilen çıkış akımı dalga biçimi düzgün bir şekilde alınması için uygun band aralığında bir amplifikatör kullanılması gerekmektedir (Mallineni vd., 2017). Bu tez çalışmasında, TENJ'lerin düşük sinyalli akımını ölçmek için akım-gerilim dönüştürücü bir devre kullanılmıştır (Şekil 35). Dönüştürücü devre, Clemson Üniversitesi'nde geliştirilen ultra düşük girişli 1,6 V/ μ s dönüş hızlı akım amplifikatörü çipi "IC LMC 6001 (CNI 570)" kullanılarak oluşturulmuştur. Bu devrede, düşük gürültülü akım preamplifikatörü SR570 yerine CNI 570'teki akım-gerilim dönüştürücü elektronik devresi kullanılmıştır. Özelleştirilmiş akım-gerilim dönüştürücü devresi, dönüştürme oranının (500 mV/ μ A veya 100 mV/ μ A) belirlendiği geri besleme dirençlerini (500 k Ω /100 k Ω) kullanarak kuruldu. Çalışmada kullanılan akım-gerilim dönüştürücü amplifikatörün devre bağlantı şeması Şekil 36'da gösterilmektedir. Devre bağlantı şeması Digi-Key programı kullanılarak çizilmiştir. Çıkış akımının değerini daha düzgün gözlemleyebilmek için yükselticinin önüne doğrultucu diyot desteği konulmuştur (Mallineni vd., 2017; Ahmed vd., 2019).



Şekil 36. Akım-gerilim dönüştürücü amplifikatörün devre bağlantı şeması

Bu çalışmada ince filmlerin triboelektrik ve elektriksel özellikleri oda sıcaklığında Keithley 2461 marka kaynak ölçer kullanılarak ölçülmüştür. ZnO ince filmlerin akım (I) ve gerilim (V) eğrileri osiloskop ile görüntülenmiş ve TEKTRONIX firmasına ait KickStart (Sürüm 2.4) yazılımı kullanılarak çıkış verileri elde edilmiştir.

6. BULGULAR

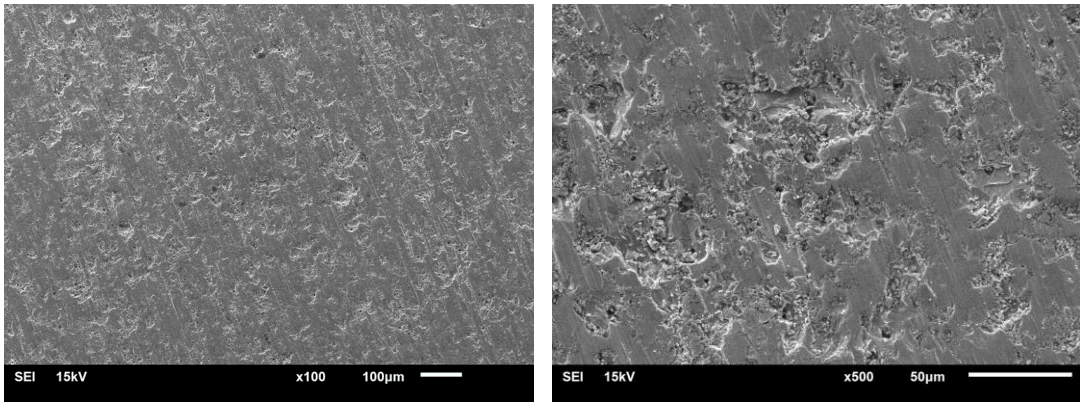
6.1. Hedef ve Alttaşın Özellikleri

Yapılan tez çalışmasında Şekil 37’de gösterilen ZnO, manyetik alanda sıçratma sisteminde hedef olarak kullanılmıştır. Hedef yüzeyinin ve enerji aralığının düzgün olup olmadığını belirlemek için farklı birim büyütmelerde SEM ile görüntüsü ve XRD deseni ile yapısı detaylı olarak incelenmiştir.

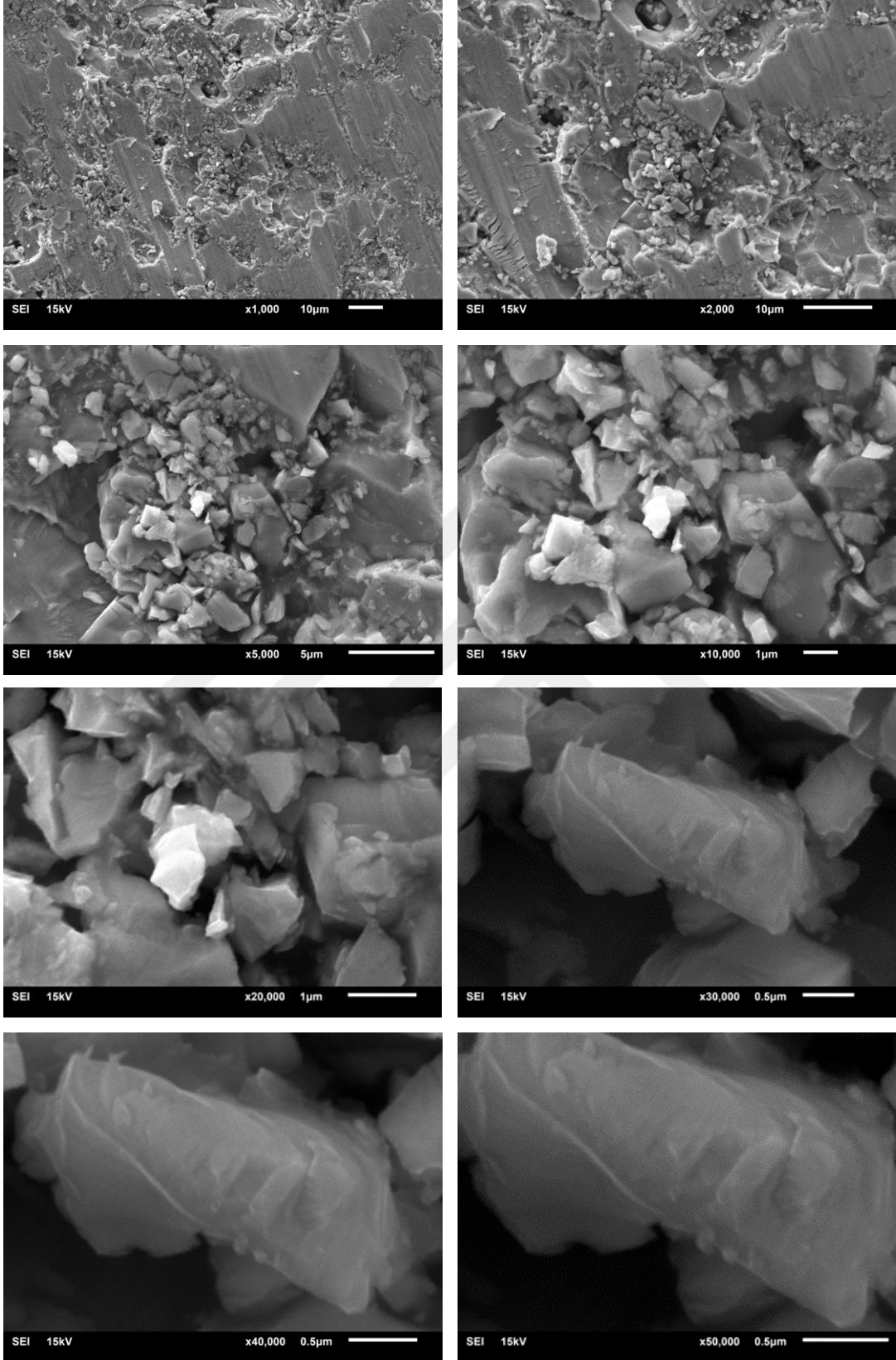


Şekil 37. ZnO hedef

Çinko oksit hedefin 100, 500, 1.000, 2.000, 5.000, 10.000, 20.000, 30.000, 40.000 ve 50.000 birim büyütmelerdeki SEM görüntüsü Şekil 38’de gösterilmiştir. Farklı birim büyütmelerde yapılan detaylı görüntülemelere göre hedef istenildiği gibi homojen bir yapıya sahiptir.

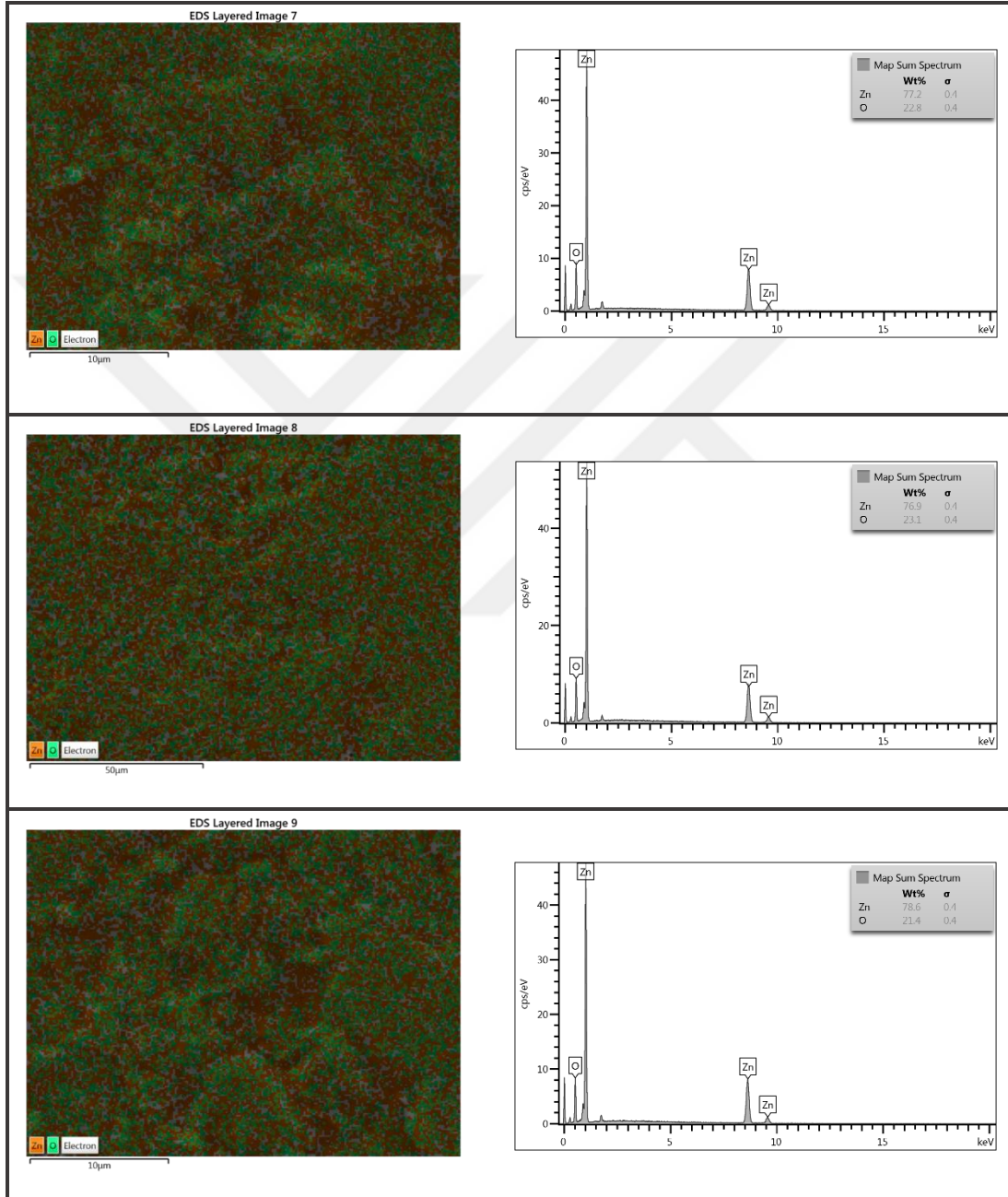


Şekil 38. ZnO hedefin farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüsü



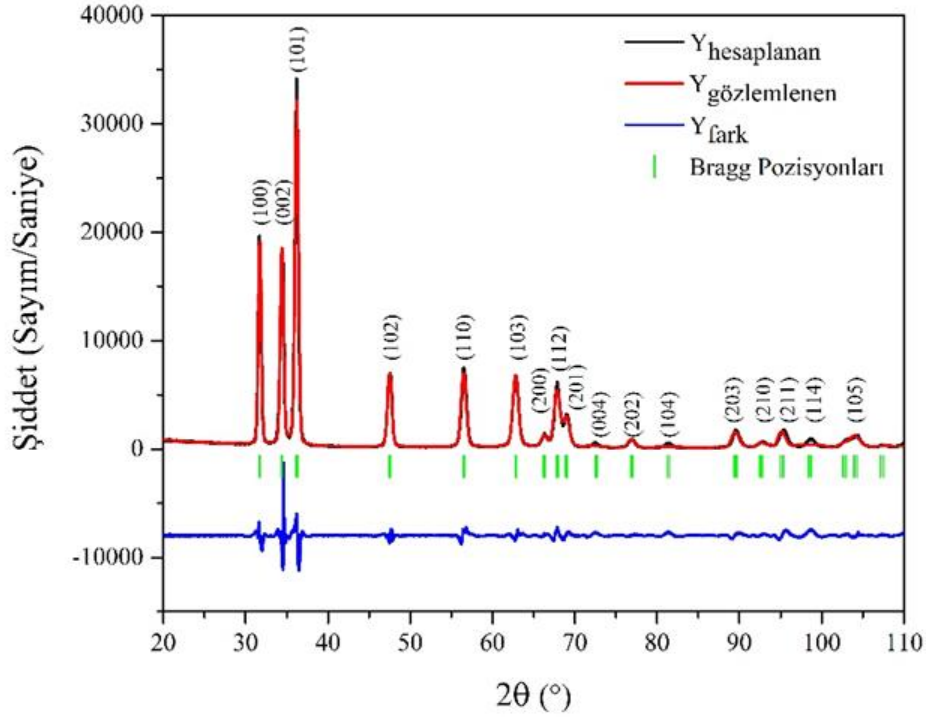
Şekil 38 (Devam). ZnO hedefin farklı büyütmelede elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 39'da ZnO hedefin EDX analiz sonucu görülmektedir. ZnO hedefin kompozisyonu incelendiğinde ortalama yüzde atomik değerlerinin Zn için $77,56 \pm 1,5$ O için $22,43 \pm 1,5$ olduğu bulunmuştur. Böylece ZnO hedefin beklenen uygun kompozisyonda olduğu belirlenmiştir (Arıç, 2010; Yüzüak vd., 2022).



Şekil 39. ZnO hedefin SEM kullanılarak elde edilen EDX analizi

ZnO hedefin, X-ışını difraktometresi ile kristal yapısı incelenmiştir. Şekil 40'da ZnO hedefin $2\theta = 20 - 110^\circ$ arasında alınan XRD deseni verilmiştir. XRD deseni incelendiğinde ZnO hedefe ait temel piklere rastlanmıştır dolayısıyla literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 40. ZnO hedefin XRD kırınım deseni ve arıtım sonucu

ZnO alaşım hedefin Rietveld Analizi sonucu atomlarının konumları ve hücre parametreleri Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Arıtım sonucu hedefin birim hücre parametreleri $a = b = 3,25(1) \text{ \AA}$ ve $c = 5,21(1) \text{ \AA}$ olarak bulunmuştur. Arıtımın doğruluğunu gösteren Bragg R-faktörü = 9,7, RF-faktör = 10,1 ve $\chi^2 = 1,2$ olarak hesaplanmıştır. R faktörlerinin 10 veya 10 değerinden daha küçük olması ve χ^2 değerinin 1'e yakın olması arıtımın iyi gerçekleştiğini göstermektedir.

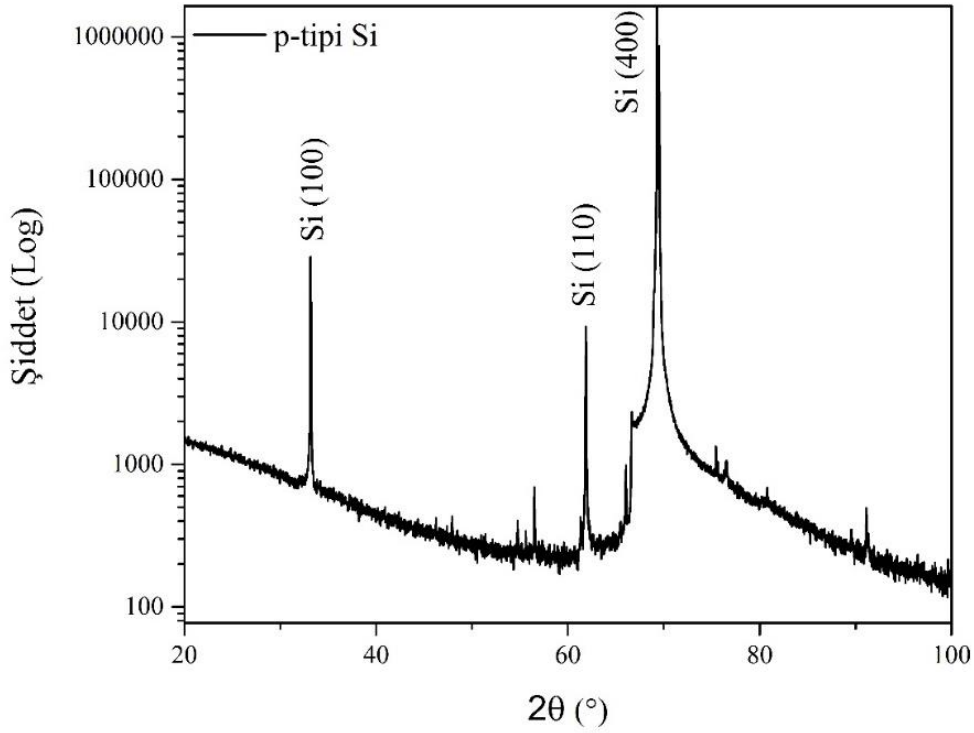
Tablo 4. Rietveld Analizi sonucunda elde edilen çinko ve oksijenin atom konumları

Atom Konumları	x	y	z
Zn	0,33	0,67	0
O	0,33	0,67	0,38

Tablo 5. Rietveld Analizi sonucunda elde edilen ZnO hedefin birim hücre parametreleri

Hücre Parametreleri(Å)	
a	3,25(1)
b	3,25(1)
c	5,21(1)

Büyütme öncesinde Si(100) tek kristal alttaş olarak kullanılacak olan malzemenin büyütme doğrultularından ve kristal yapısının doğruluğundan emin olmak için X-ışını kırınım deseni alınmıştır. Si alttaşın 20 ile 100° arasında alınan XRD deseni Şekil 41’de gösterilmektedir.



Şekil 41. p-tipi Si(100) alttaşın XRD kırınım deseni

Yüksek çözünürlükte alınan XRD deseni incelendiğinde Si desenine ait olan temel pikler gözlemlenmiştir ve grafik üzerinde belirtilmiştir. Temel piklerin yanı sıra p-tipi silisyum alttaşın düşük şiddetlerdeki alt kırınım düzlemlerine ait Bragg pozisyonu da rahatça gözlemlenebilmektedir.

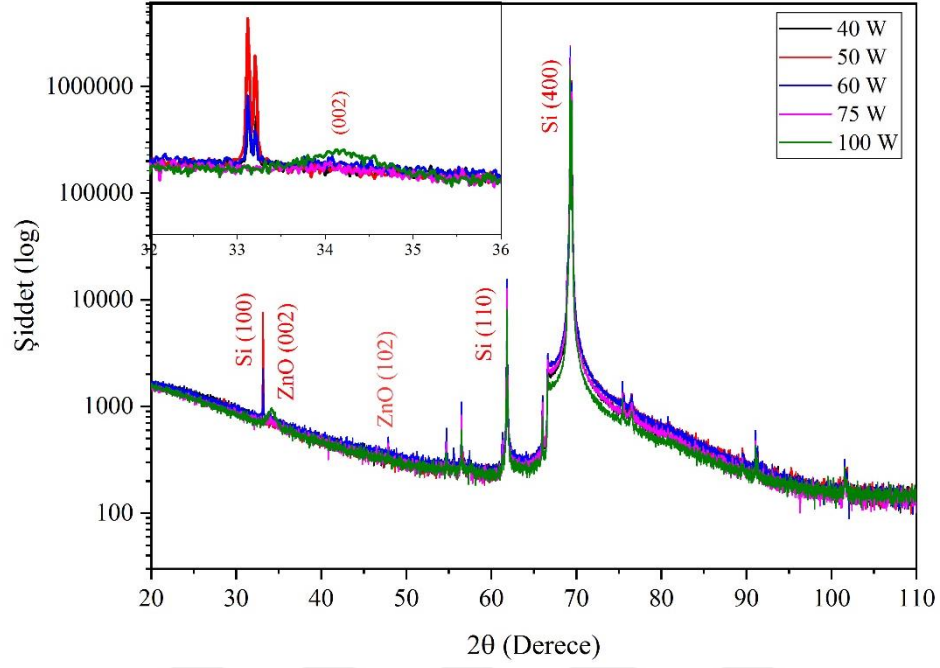
6.2. Isıl İşlem Öncesi ZnO İnce Filmlerin Özellikleri

Triboelektrik mekanizmasında sürtünme katmanı olarak kullanılacak olan ZnO ince filmler manyetik alanda sıçratma sistemi ile literatür taramasında uygun alttaş sıcaklığı olarak seçilen 200 °C’de Si(100) alttaş üzerine farklı parametrelerde büyütülmüştür (Yüzüak vd., 2022). Öncelikle filmler farklı sıçratma güçlerinde büyütülmüştür ve filmler için en uygun sıçratma gücü belirlenmiştir. Sonrasında sistemin çalışabileceği en düşük basınç değeri de dâhil edilerek farklı sıçratma basınçlarda büyütme yapılmıştır. Uygun sıçratma basıncı belirlenen filmlere Argon gazının yanında farklı yüzdelik oranlarda yüksek saflıkta (% 99,99) O₂ gazı ilave edilip film büyümesine katkısı değerlendirilmiştir. ZnO ince filmler biriktirme esnasında ortamdaki oksijenden etkilemektedir. Filmin büyüme oranı; iletkenlik, kalınlık, yüzey pürüzlülüğü gibi birçok parametreyi etkilemektedir. En uygun büyütme parametreleri belirlenen ZnO ince filmler son olarak farklı kalınlıklarda büyütülmüştür. Böylece kalınlığın film büyümesine etkisi de değerlendirilmiştir. Üretilen ince filmlerin uygunluğu XRD, SEM, AFM ve XRR ölçümleri ile belirlenmiştir.

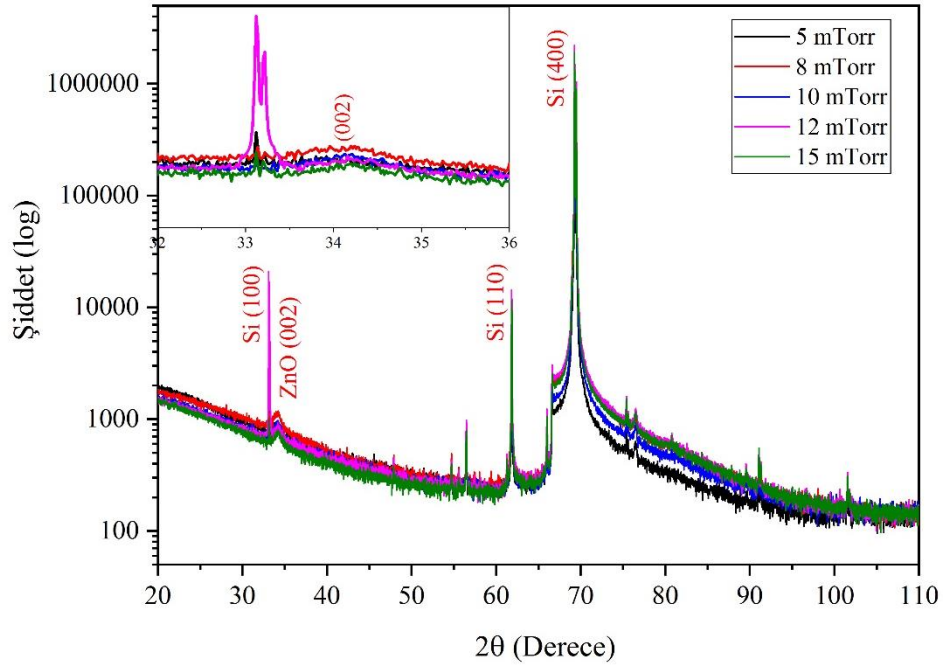
6.2.1. ZnO İnce Filmlerin X- Işını Kırınım Sonuçları

ZnO ince filmlerin kristal yapısının belirlenebilmesi için XRD desenleri $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$ aralığında ve $\Delta 2\theta = 0,02^\circ$ derecelik adımlarla alınmıştır. Şekil 42’de 200 °C alttaş sıcaklığında Si(100) üzerinde 40, 50, 60, 75 ve 100 W sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmin XRD kırınım deseni sonuçları gösterilmektedir. XRD kırınım deseni incelendiğinde 40, 50, 60 W sıçratma güçlerinde herhangi bir yansıma pikine rastlanmamıştır. 100 W sıçratma gücünde wurtzite fazına ait (002) ve (102) pikleri gözlemlenmiştir. 75 W sıçratma gücünde wurtzite fazına ait (002) elde edilmeye başlanmakla birlikte en şiddetli 100 W sıçratma gücünde görülmüştür. Sıçratma gücü 100 W üzerindeyken hedef bozulmaya başlamıştır ve sistem ısınmaya başlamıştır. Sistemin sağlıklı çalışması için 100 W sıçratma gücüne kadar ölçüm alınmıştır. 100 W Sıçratma gücü belirlenen filmler uygun sıçratma basıncının belirlenebilmesi için vakum sisteminin izin verdiği 5-15 mTorr aralıklarda büyütülmüştür. Şekil 43’te 5, 8, 10, 12 ve 15 mTorr sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni verilmiştir. Tüm sıçratma basınçlarında

wurtzite (002) pikine ait yansıma gözlemlenmekle birlikte en yüksek 8 mTorr sıçratma basıncında kırınımına uğradığı belirlenmiştir.

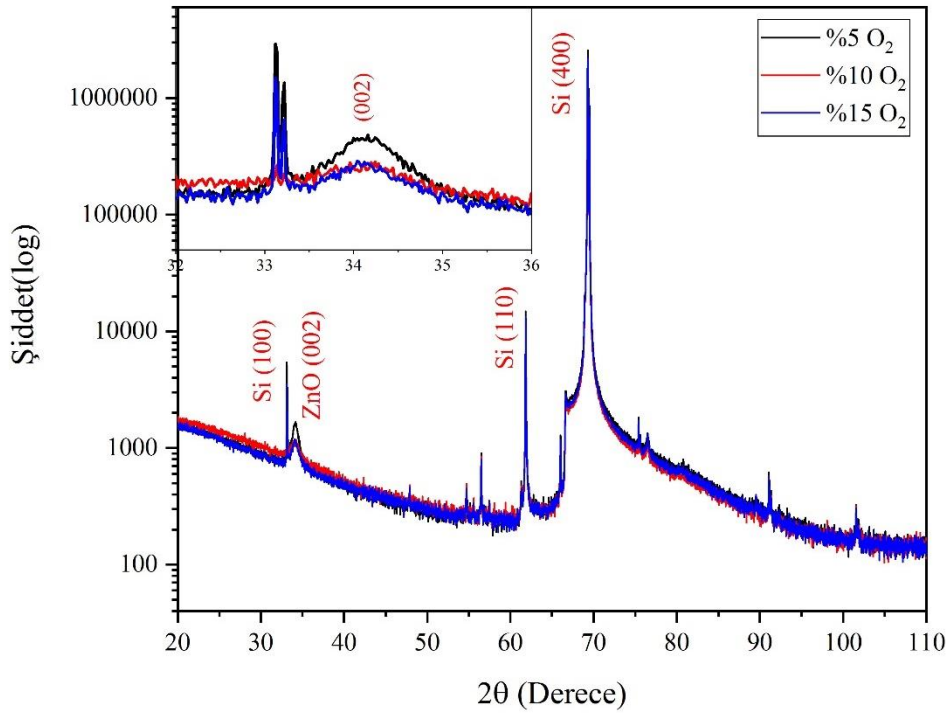


Şekil 42. Farklı sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni



Şekil 43. Farklı sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni

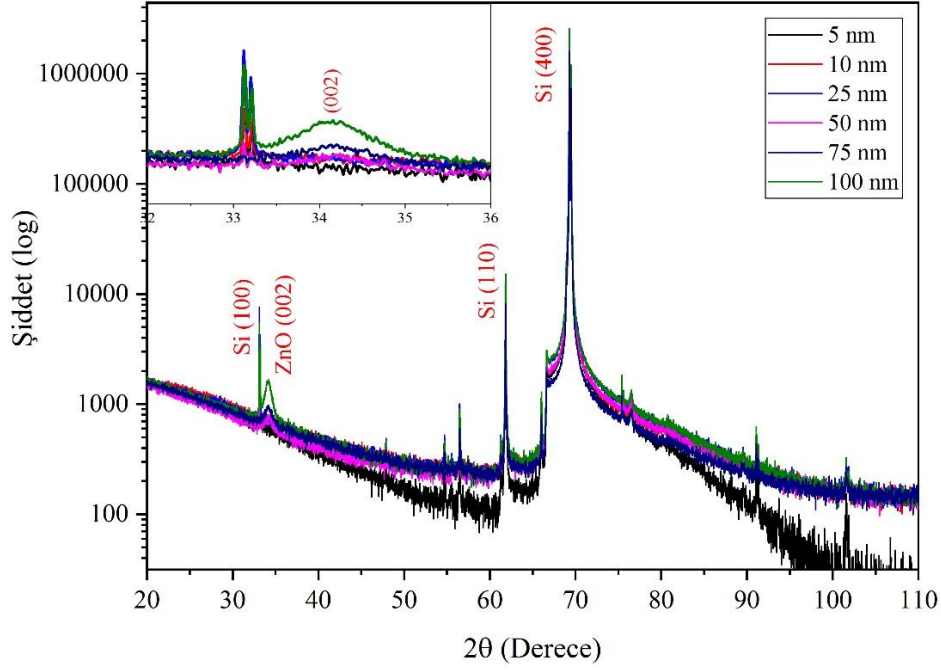
Sıçratma gücü 100 W, sıçratma basıncı 8 mTorr seçilen ince filmler uygun kısmi O₂ basıncının belirlenebilmesi için yine vakum sisteminin izin verdiği ve kararlılığın sürdürülebileceği değer aralığı olan %5, %10 ve %15 oranlarında kısmi O₂ basıncı altında büyütülmüştür. Şekil 44'te %5, %10 ve %15 kısmi O₂ basıncı altında büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni verilmiştir. Şekil 44 incelendiğinde %10 ve %15 kısmi O₂ basıncında büyütülen ince filmlerin %5 kısmi O₂ basıncında büyütülen ince filme göre wurtzite fazının (002) pikinde daha yayvan bir yansıma olduğu gözlemlenmiştir. ZnO ince filmin en şiddetli %5 O₂ basıncında kırınımına uğradığı gözlemlenmektedir. Oksijen basıncının artmasının filmin büyüme oranını düşürdüğü açıkça görülmektedir. Büyütme sisteminde %5 altındaki O₂ değerleri sistemin kararlılığını ve film büyümesini bozduğu için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 44. Farklı kısmi O₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni

100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı ve %5 kısmi O₂ basıncı belirlenen ZnO ince filmler farklı kalınlıklarda tekrar büyütülmüştür ve XRD kırınım deseni alınmıştır. Şekil 45'te 5, 10, 25, 50, 75 ve 100 nm kalınlıklarda büyütülen ince filmlerin XRD kırınım deseni verilmiştir. ZnO'nun wurtzite fazının (002) yansıması

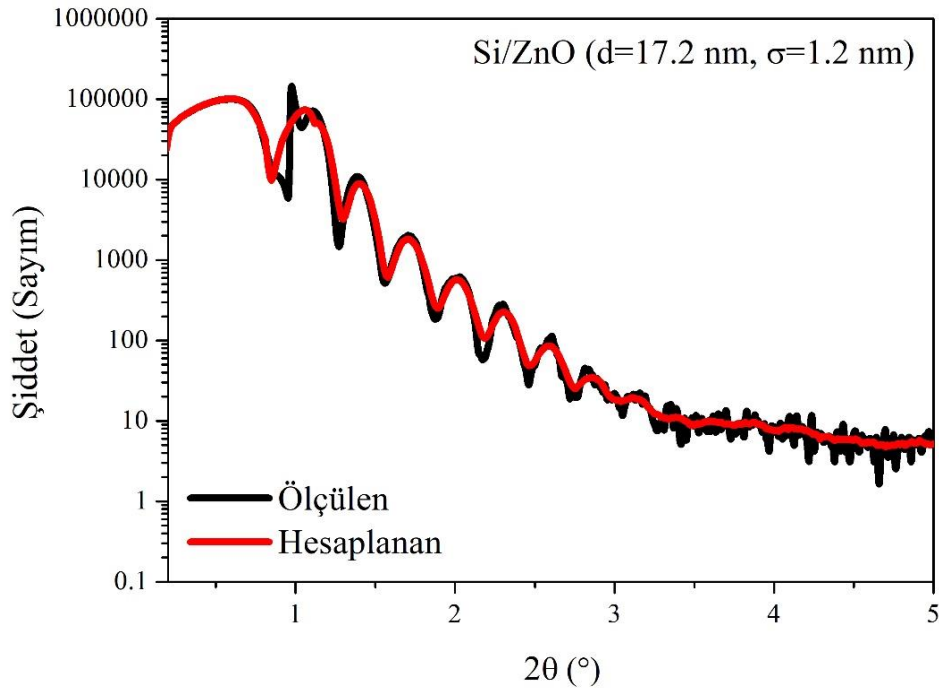
farklı kalınlıkta filmlerin hepsinde görülmüştür. Fakat artan kalınlıkla birlikte ZnO ince filmin (002) pikinin şiddetinin arttığı gözlemlenmektedir. Buradan kristallenmenin kalınlıkla beraber doğru orantılı olmasada 100 nm’lik ince filmin diğer filmlere göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak büyütülen filmler için en uygun parametrelerin 100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı ve 100 nm kalınlık olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 45. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni

6.2.2. ZnO İnce Filmlerin X-Işını Reflektometresi Sonuçları

XRD deseninden en uygun örnek seçildikten sonra üretilen ZnO ince filmin kalınlığının, yüzey pürüzlülüğünün ve yoğunluğunun hesaplanabilmesi için XRR ölçümleri alınmıştır. ZnO ince film örneğin kalınlığı GenX-3 yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 46’da ZnO ince filmin XRR sonuçları verilmiştir. Elde edilen grafikte ölçülen XRR verileri uyum edilerek ölçülen ve hesaplanan eğrileri elde edilmektedir.

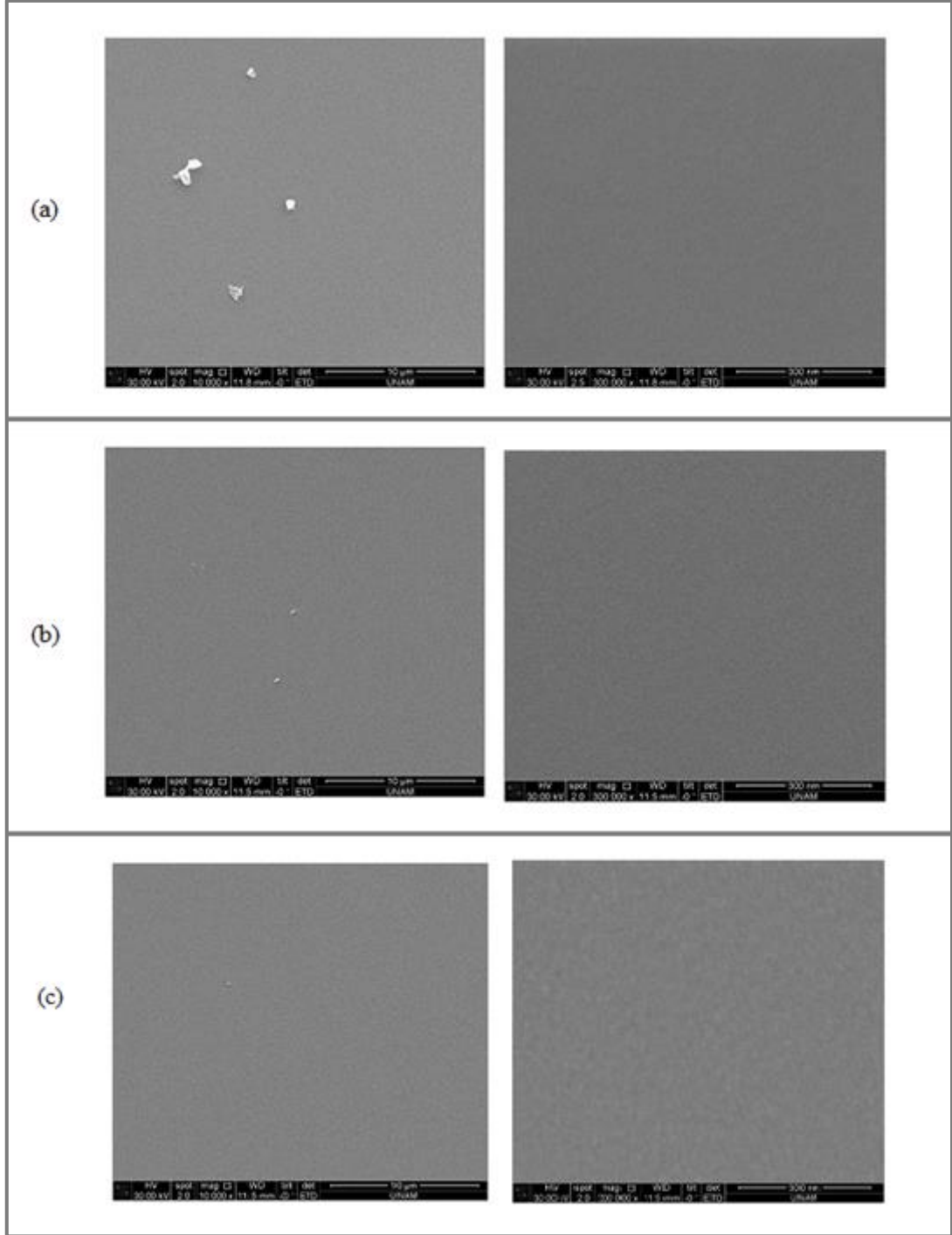


Şekil 46. ZnO ince filmin XRR deseni sonuçları

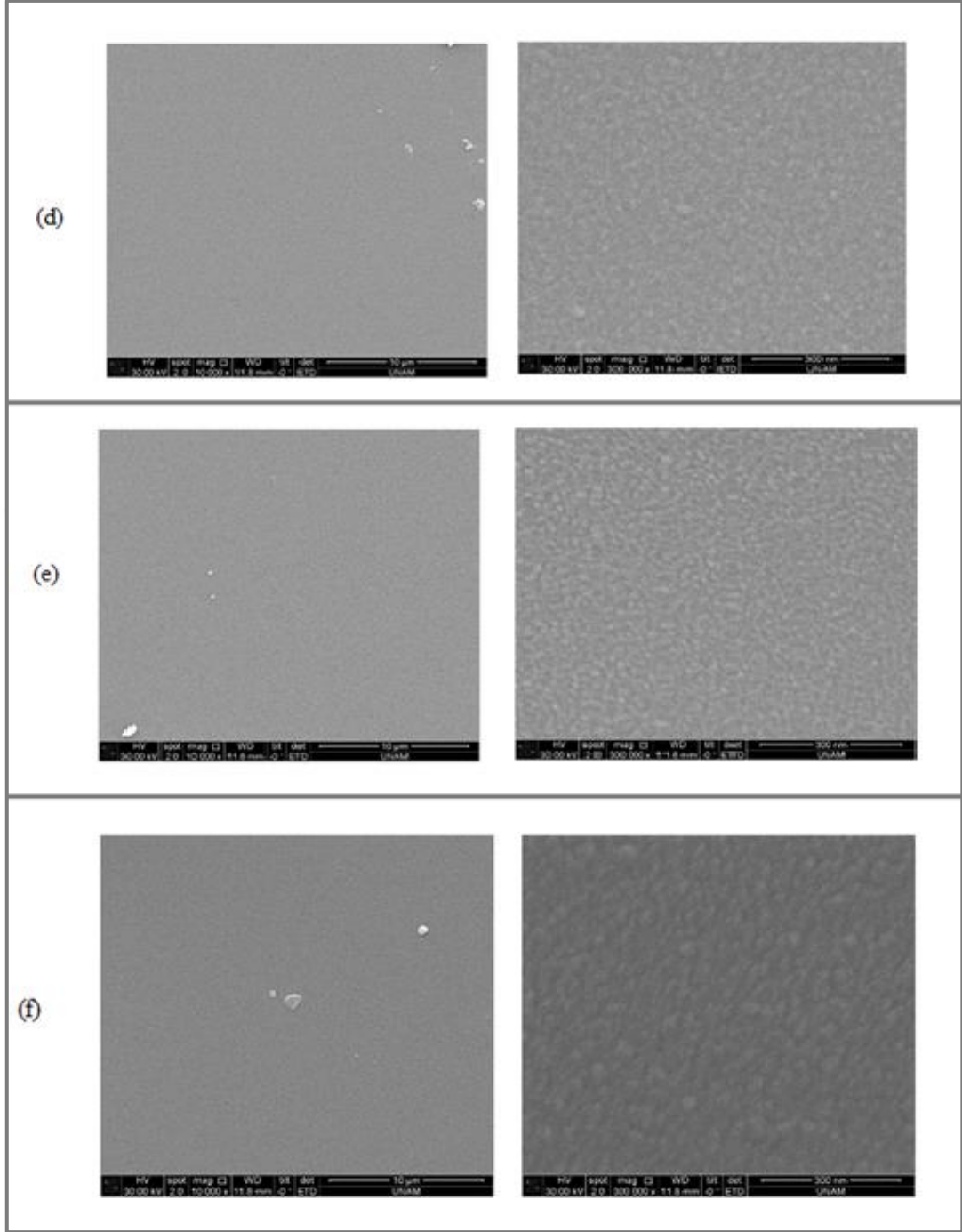
Elde edilen verilerden ince filmin yaklaşık olarak kalınlığı (d) 17,2 nm, yüzey pürüzlülüğü (σ) 1,2 nm ve yoğunluğu $5,63 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Rosa ve arkadaşları 2012 yılında kısmi oksijen basıncında yaptıkları çalışmada RF manyetik alanda sıçratma sistemi ile ürettikleri ZnO ince filmin yüzey pürüzlülüğünü $0,76 (\pm 0,08) \text{ nm}$ olarak bulmuşlardır (Rosa vd., 2012). Böylece literatürde elde edilen veriler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

6.2.3. ZnO İnce Filmlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

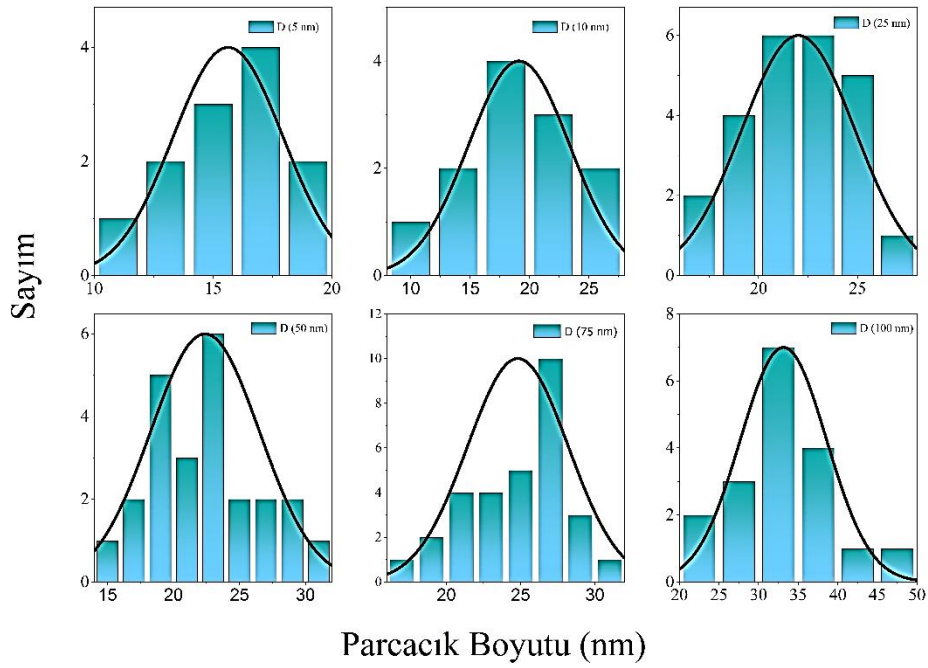
ZnO ince filmler farklı kalınlıkta üretimi gerçekleştikten sonra yüzey topografisi ve yapısının incelenmesi için SEM ile görüntüleri alınmıştır. 5, 10, 25, 50, 75 ve 100 nm kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin 10.000 ve 300.000 birim büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 47’de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde artan kalınlıkla birlikte homojenliğin değişmediği ancak parçacıkların tanecik sınırlarının belirginliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 47. ZnO ince filmlerin **a)** 5nm, **b)** 10 nm, **c)** 25 nm, **d)** 50 nm, **e)** 75 nm ve **f)** 100 nm kalınlıktaki SEM görüntüleri



Şekil 47 (Devam). ZnO ince filmlerin **a)** 5nm, **b)** 10 nm, **c)** 25 nm, **d)** 50 nm, **e)** 75 nm ve **f)** 100 nm kalınlıktaki SEM görüntüleri

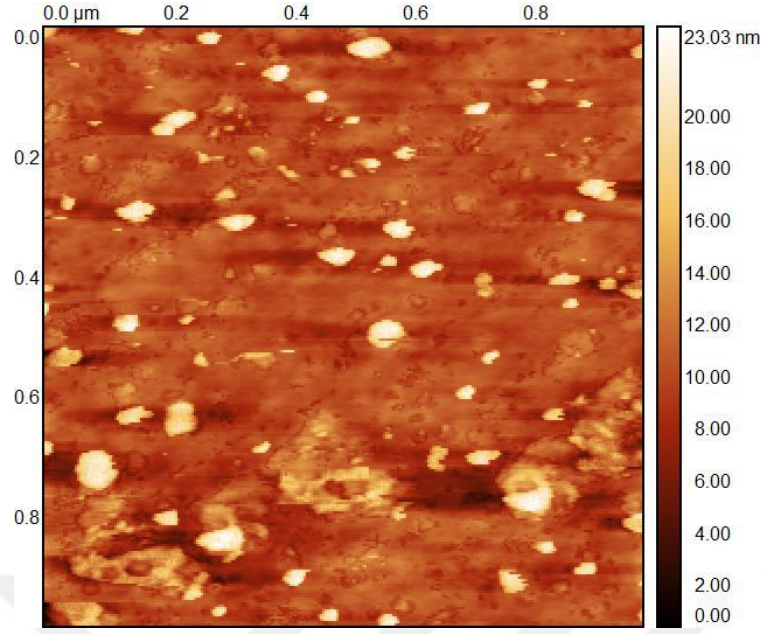


Şekil 48. ZnO ince filmlerin parçacık boyutu analizi

SEM görüntülerinden yararlanılarak elde edilen, farklı kalınlıklarda üretilen ZnO ince filmlerin parçacık boyutu analizi Şekil 48’de verilmiştir. Parçacık boyutu analizinden ZnO ince filmlerin parçacık büyüklüğünün ortalama değeri 5 nm kalınlıkta büyütülen filmin ~16 nm, 10 nm kalınlıkta büyütülen filmin ~20 nm, 25 nm kalınlıkta büyütülen filmin ~22 nm, 50 nm kalınlıkta büyütülen filmin ~23 nm, 75 nm kalınlıkta büyütülen filmin ~25 nm ve 100 nm kalınlıkta büyütülen filmin ~33 nm olduğu bulunmuştur.

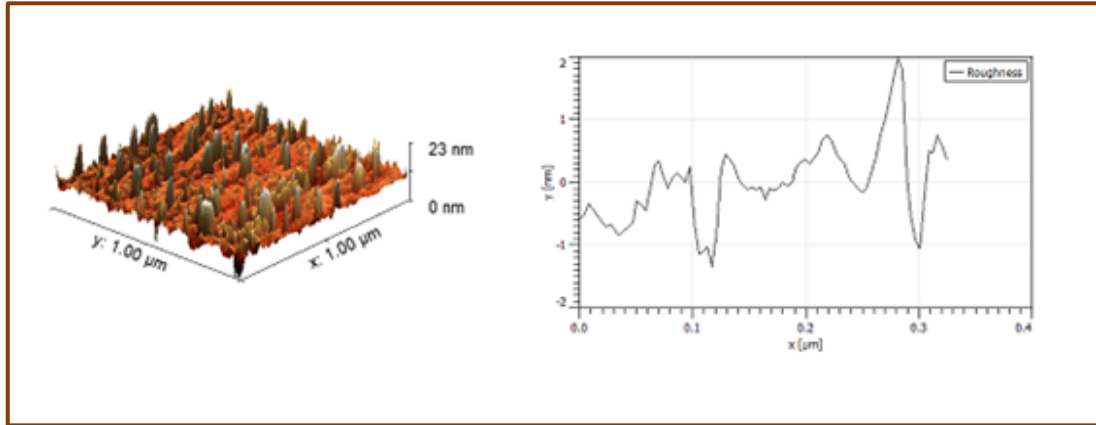
6.2.4. ZnO İnce Filmlerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları

Isıl işlem öncesinde yapılan ölçümler sonucu en iyi özellik gösteren ince film 100 nm de büyütülen ZnO ince filmin olduğu SEM görüntülerinden belirlendikten sonra ince filmin $1 \times 1 \mu\text{m}$ boyutlarda AFM ile görüntüsü (Şekil 49) alınmıştır. AFM görüntüsünden ZnO ince filmin yüzey morfolojisinde parçacıkların küresel yapıda ve homojen olduğu ayrıca SEM’den elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 49. ZnO ince filmin AFM görüntüsü

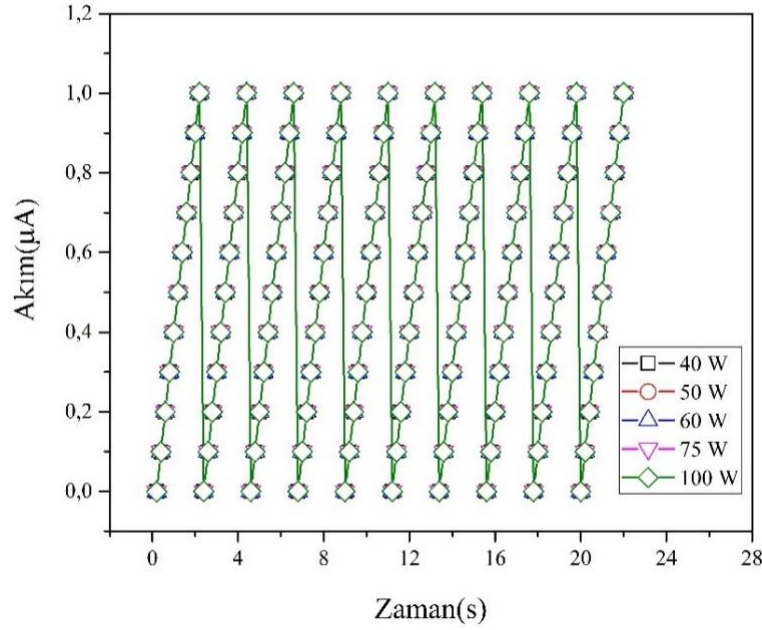
Şekil 50’de ise ZnO ince filmin topografi-yüzey pürüzlülüğü grafiği ve 3 boyutlu AFM görüntüsü görülmektedir. Elde edilen grafikte çizgisel yüzey pürüzlülüğü ortalama değerinin yaklaşık 1,1 nm olduğu bulunmuştur. Bu değer XRR’den bulunan değer ile uyumludur.



Şekil 50. ZnO ince filmin 3 boyutlu AFM görüntüsü ve topografi-yüzey pürüzlülüğü grafiği

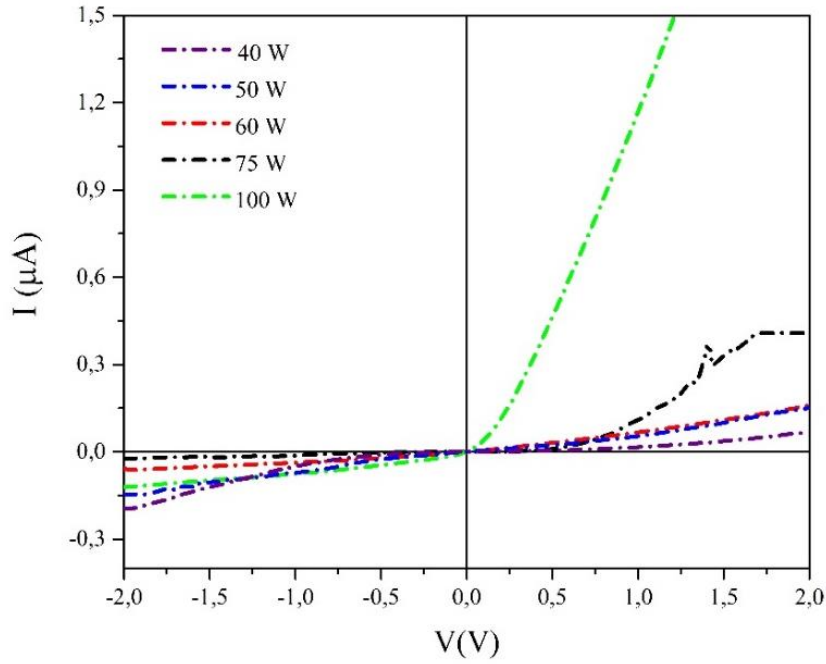
6.2.5. ZnO İnce Filmin Elektriksel Sonuçları

Farklı parametrelerde üretilen ince filmlerin direnç ölçümü için Van Der Pauw yöntemi kullanılmıştır. Kaynakmetre ile ölçülen akım-gerilim değerlerinden yararlanılarak öz direnç hesabı yapılmıştır. Isıl işlem öncesinde 100 nm kalınlıkta büyütülen ince film kullanılarak hazırlanan Au/p-Si/ZnO/Au diyotun öz direnci $1,6 \times 10^{-10} \Omega$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 51. Farklı sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği

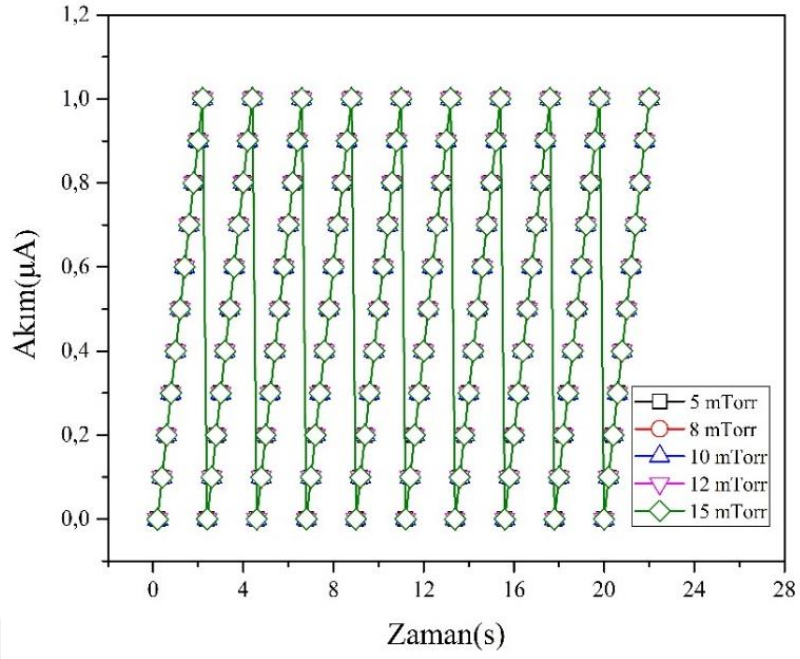
ZnO ince filmlerin uygun sıçratma gücü, sıçratma basıncı, kısmi O_2 basıncı ve kalınlıklarının alınması esnasında alınan veriler ile filmlerin akım-gerilim karakteristiği de incelenmiştir. Farklı sıçratma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin Şekil 51’de akım-zaman grafiği verilmiştir. Akım zaman grafiklerinden elde edilen bulguların amacı zamana bağlı elektriksel özelliklerin tekrarlanabilirliklerinin olup olmadığının belirlemek ve malzemenin homojenliği hakkında bilgi edinmektir. Buna göre, Şekil 51 incelendiğinde filmlere uygulanan gerilimlere karşın elde edilen akım değerleri neredeyse zamana bağlı olarak aynı değerler elde edildiğinde bulunmuştur. Bu durumda örnek yüzeyindeki elektriksel saçılma noktalarının homojenliğinin olduğunu kanıtlamaktadır.



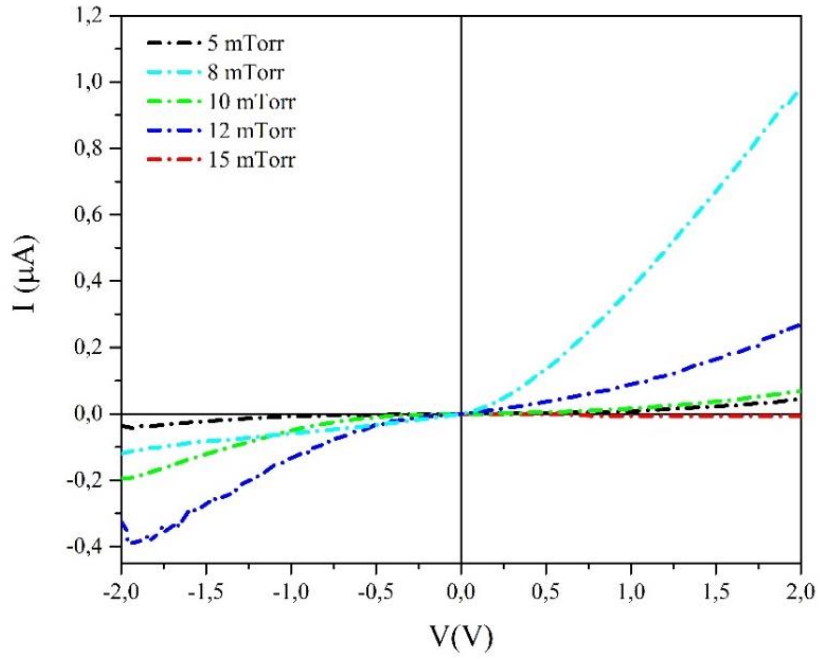
Şekil 52. Farklı sıştırma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği

Şekil 52’de ise farklı sıştırma güçlerinde büyütülen ZnO ince filmlerin -2 V ile +2 V gerilim değerlerine bağlı akım-gerilim grafiği verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde gerilim değeri 2 V’a yaklaşırken akım değeri en fazla 100 W sıştırma gücünde arttığı görülmüştür. Dolayısıyla akımın artması direncin düşmesine neden olmaktadır. Bu özellik elektriksel ölçümlerde istenilen özelliklerden bir tanesidir.

100 W sıştırma gücünde büyütülen ZnO ince filmler, farklı sıştırma basınçlarında büyütülmüştür. Farklı sıştırma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin Şekil 53’te akım-zaman grafiği ve Şekil 54’te akım-gerilim grafiği verilmiştir. Farklı güçlerde elde edilen filmlerde ortaya çıkan sonuçlara benzer şekilde akım-zaman grafiğinde (Şekil 53) ZnO filmlere uygulanan gerilim değerlerine karşı zamana bağlı akım değerleri yaklaşık aynı değerler bulunmuştur. Böylece örnek yüzeyindeki elektriksel saçılma noktalarının homojenin korunduğu görülmüştür. Farklı sıştırma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmin akım-gerilim grafiği (Şekil 54) incelendiğinde ise -2 V ile +2 V gerilim arasında 100 W sıştırma gücünde büyütülmüş ince filmlerden en yüksek akım değerinin 8 mTorr sıştırma basıncında elde edildiği görülmektedir.

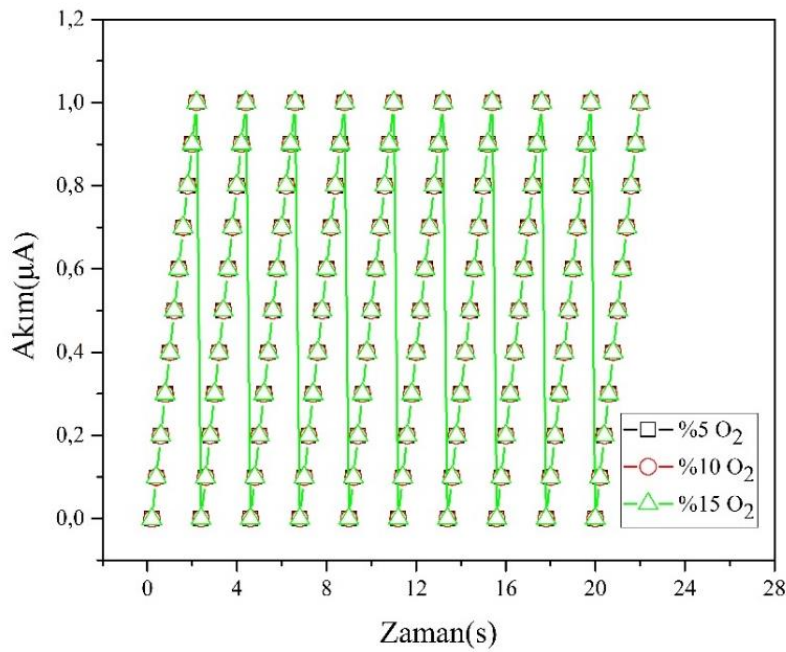


Şekil 53. Farklı sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği



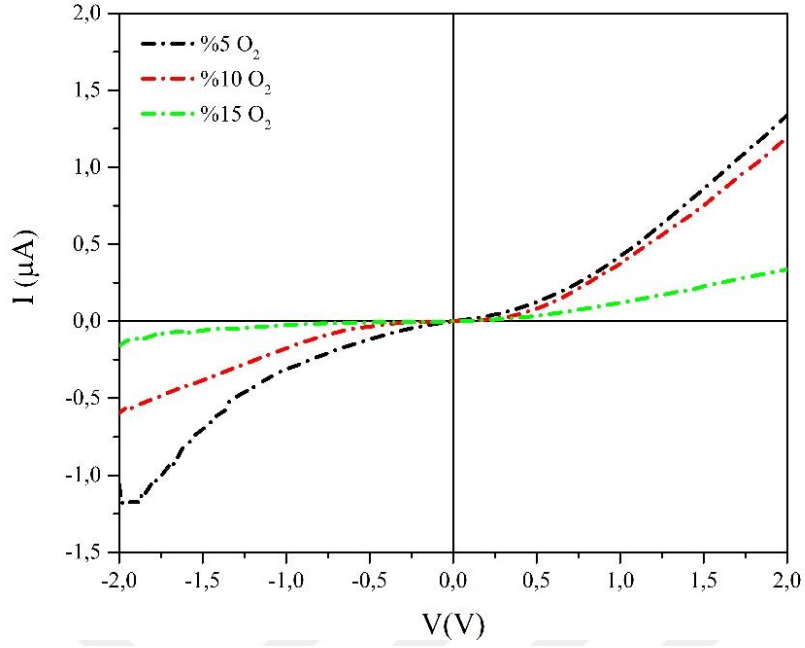
Şekil 54. Farklı sıçratma basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği

100 W sıçratma gücü ve 8 mTorr sıçratma basıncı altında büyütülen ZnO ince filmler, %5, 10 ve 15 kısmi O₂ basınçları altında tekrar büyütülmüştür ve kısmi O₂ basıncının katkısı değerlendirilmiştir. Farklı kısmi O₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin Şekil 55'te akım-zaman grafiği ve Şekil 56'da akım-gerilim grafiği verilmiştir. Farklı güçlerde ve sıçratma basınçlarında elde edilen filmlerde ortaya çıkan sonuçlara benzer şekilde kısmi O₂ basıncında büyütülen ZnO ince filmlerin akım zaman grafiğinde (Şekil 55) filmlere uygulanan gerilimlere karşın elde edilen akım değerleri zamana bağlı olarak yaklaşık aynı değerler bulunmuştur ve böylece örnek yüzeyindeki elektriksel saçılma noktalarının homojen olduğu görülmüştür.



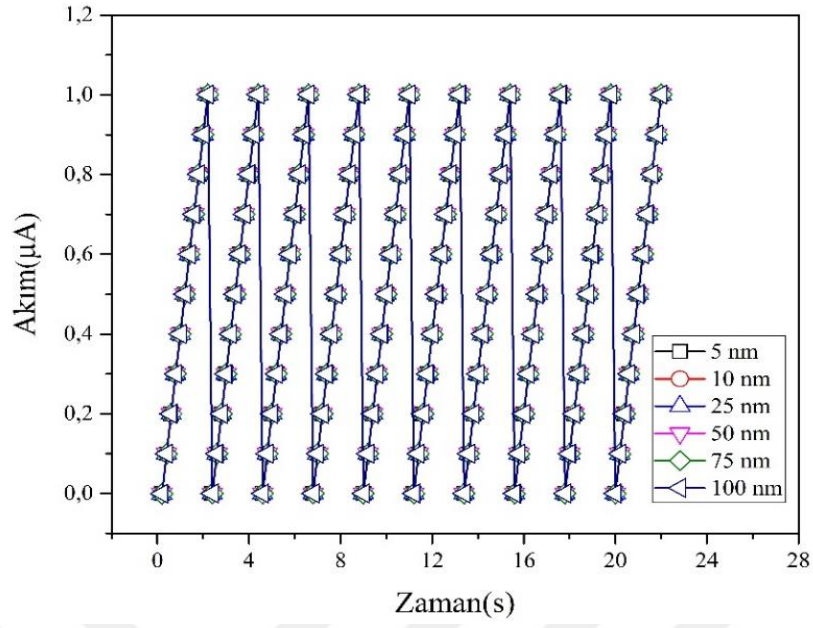
Şekil 55. Farklı kısmi O₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği

Farklı kısmi O₂ basınçlarında akım-gerilim grafiği (Şekil 56) incelendiğinde ise -2 V ile +2 V gerilim arasında %5 kısmi O₂ basıncı altında büyütülen ZnO ince filmin diğer kısmi basınçlarda üretilen filmlere göre elektriksel özelliklerinin daha iyi olduğu görülmektedir.

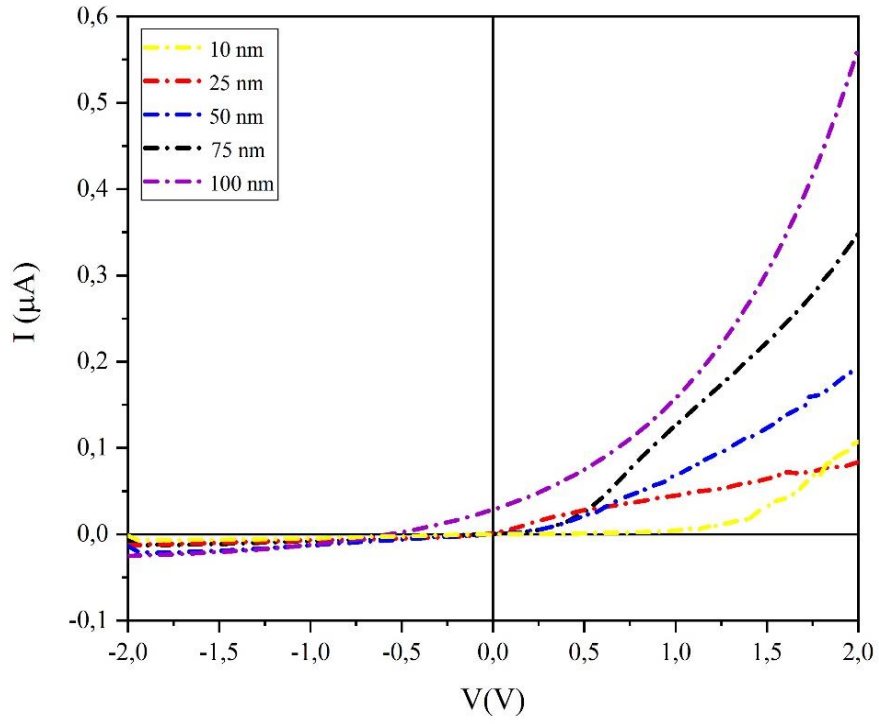


Şekil 56. Farklı kısmi O₂ basınçlarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği

100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı ve %5 kısmi O₂ basıncı altında büyütülen ZnO ince filmler 5, 10, 25, 50, 75 ve 100 nm kalınlıklarda tekrar büyütülmüştür ve film kalınlığının etkisi değerlendirilmiştir. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmin Şekil 57’de akım-zaman grafiği ve Şekil 58’de akım-gerilim grafiği verilmiştir. Farklı güçlerde, basınçlarda ve kısmi oksijen basınçlarında elde edilen filmlerde olduğu gibi Şekil 57’de farklı kalınlıkta büyütülen filmlerde uygulanan gerilim değerlerine karşı elde edilen akım değerleri zamana bağlı olarak yaklaşık aynı değerler bulunmuştur yani homojenlik korunmuştur. Akım-gerilim grafiği (Şekil 58) incelendiğinde ise 100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı altında büyütülen ZnO ince film için (-2 V ile +2 V gerilim arasında) elektriksel özellikleri en iyi 100 nm kalınlıkta büyütme sonucu olduğu görülmektedir. Akım-gerilim grafiğinde 5 nm kalınlıkta büyütülen ince filmin değerleri çok düşük olduğu için gösterilmemiştir.



Şekil 57. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği



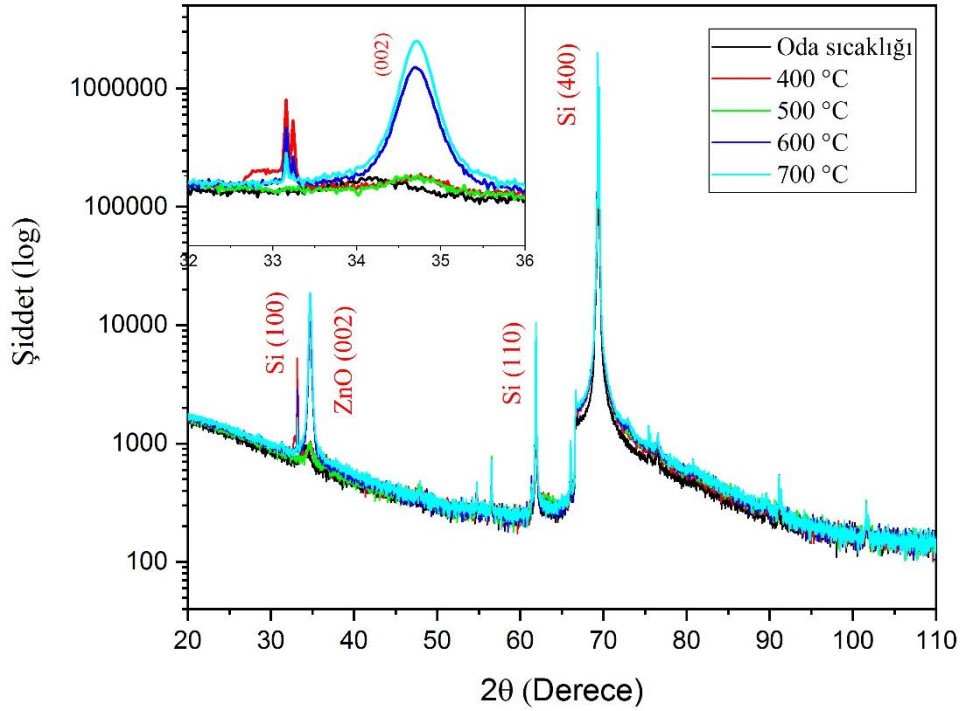
Şekil 58. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği

6.3. Isıl İşlem Sonrası ZnO İnce Filmlerin Özellikleri

Farklı büyütme koşullarında üretilen ince filmler için X-ışınımı kırınımı ve elektriksel ölçümlerden en uygun parametrelerin 100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı ve 100 nm kalınlık olduğu belirlendikten sonra bu filmler 1 saat boyunca farklı sıcaklıklarda (400 °C, 500 °C, 600 °C ve 700 °C) oksijen atmosferinde ısıtılmasına tabii tutulmuştur. Isıl işlemin film büyümesine katkısı değerlendirilmiştir.

6.3.1. Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Sonuçları

ZnO ince filmlerin ısıtılma sonrası kristal yapısının belirlenebilmesi için kırınım desenleri $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$ aralığında ve $\Delta 2\theta = 0,02^\circ$ derecelik adımlarla alınmıştır. Uygun büyütme parametreleri belirlenen ZnO ince film örneklerinin 400 °C, 500 °C, 600 °C ve 700 °C ısıtılma uygulandıktan sonra yapılan X-ışını kırınım sonucu Şekil 59'da gösterilmiştir.

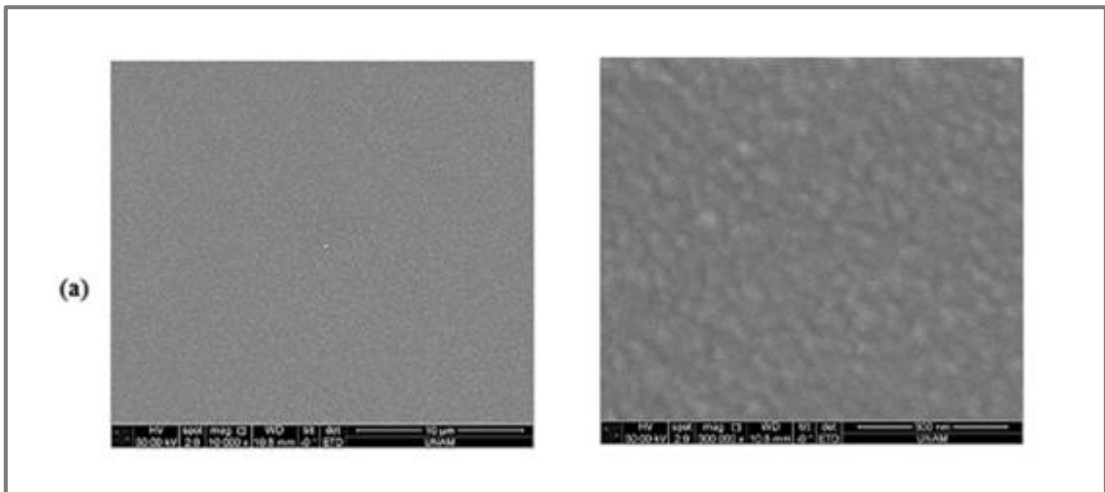


Şekil 59. Isıl işlem uygulanan ZnO ince filmlerin XRD kırınım deseni

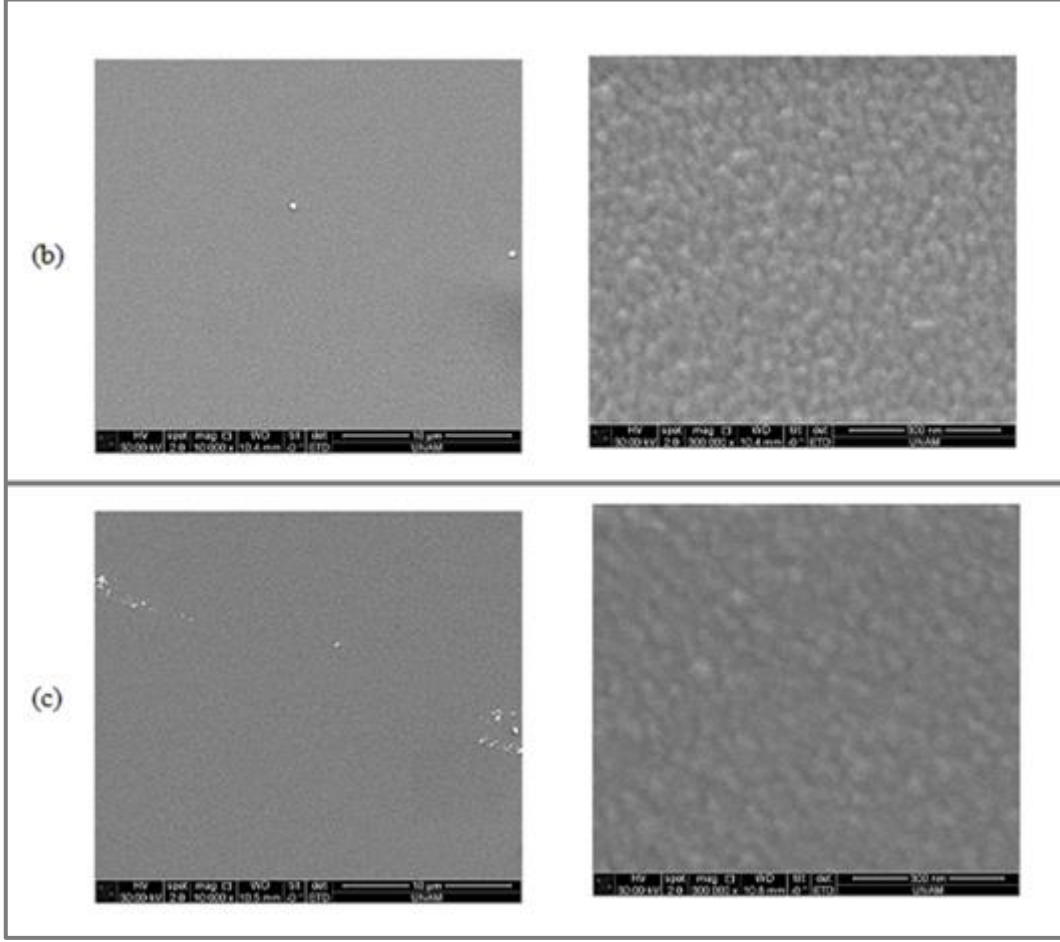
X-ışını kırınım deseni incelendiğinde artan sıcaklıkla birlikte ZnO'nun wurtzite (002) pikinde yansıma miktarı artış göstermiştir. Bu tür malzemelerde tercihli yönelim, malzemenin alttaş üzerinde büyüme ekseninin belirlenmesinde önem taşımaktadır. Şekil 59 incelendiğinde özellikle 600 °C'den sonra (002) düzlemine ait şiddetin aniden arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yukarıda belirtilen tercihli yönelimin (002) düzleminde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu artış aynı zamanda örnek üzerindeki kristallenme miktarını da arttırmaktadır. Dolayısıyla ısıtma işlemi uygulanmasının film büyümesini arttırdığı sonucuna varılabilmektedir. Ayrıca filmlerin wurtzite (002) düzleminde büyüdüğünü kanıtlamaktadır.

6.3.2. Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Isıl işlem uygulan 100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı ve 100 nm kalınlıkta büyütülen ZnO ince filmlerin yapısının ve yüzey topografilerinin incelenmesi için SEM ile görüntüleri alınmıştır. 500 °C, 600 °C ve 700 °C ısıtma işlemi uygulanan filmlerin 10.000 ve 300.000 birim büyütmede SEM ile alınan görüntüleri sırasıyla Şekil 60a, Şekil 60b ve Şekil 60c'de gösterilmektedir. Şekil 60 incelendiğinde parçacıkların homojen dağıldığı ve küresel bir şekilde olduğu görülmektedir. Artan ısıtma işlemiyle birlikte bu parçacıkların homojenliğinin değişmediği ancak parçacık büyüklüklerinin arttığı gözlenmektedir.

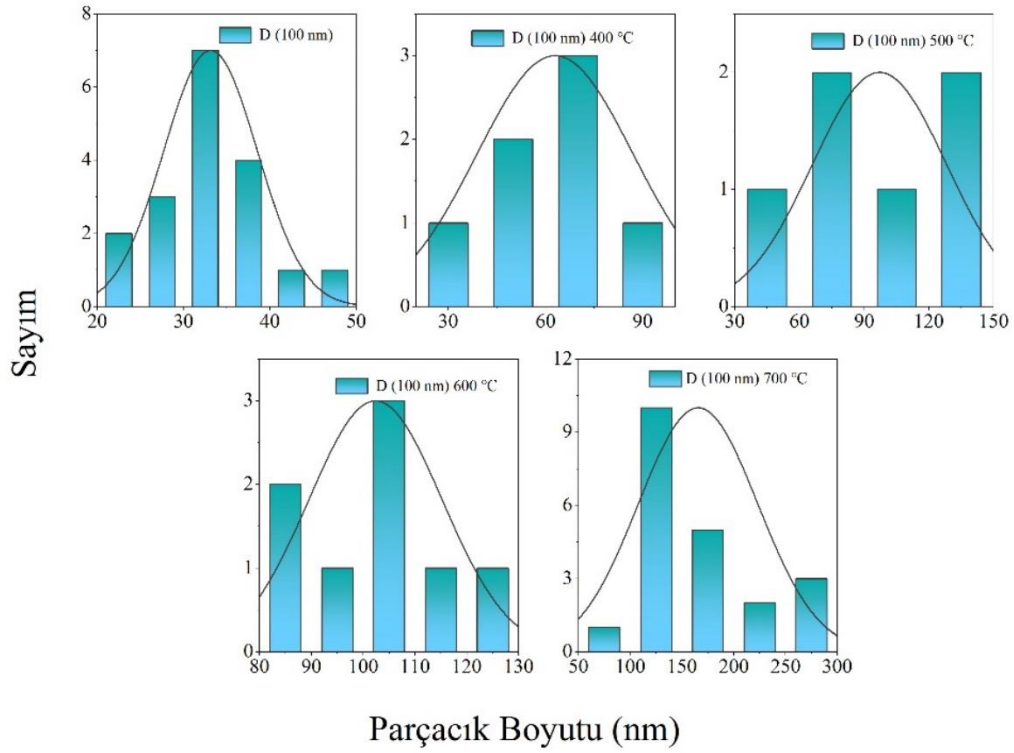


Şekil 60. ZnO ince filmlere **a)** 500 °C, **b)** 600 °C, **c)** 700 °C ısıtma işlemi uygulandıktan sonra alınan SEM görüntüleri



Şekil 60 (Devam). ZnO ince filmlere **a)** 500 °C, **b)** 600 °C, **c)** 700 °C ısıtıl işlem uygulandıktan sonra alınan SEM görüntüleri

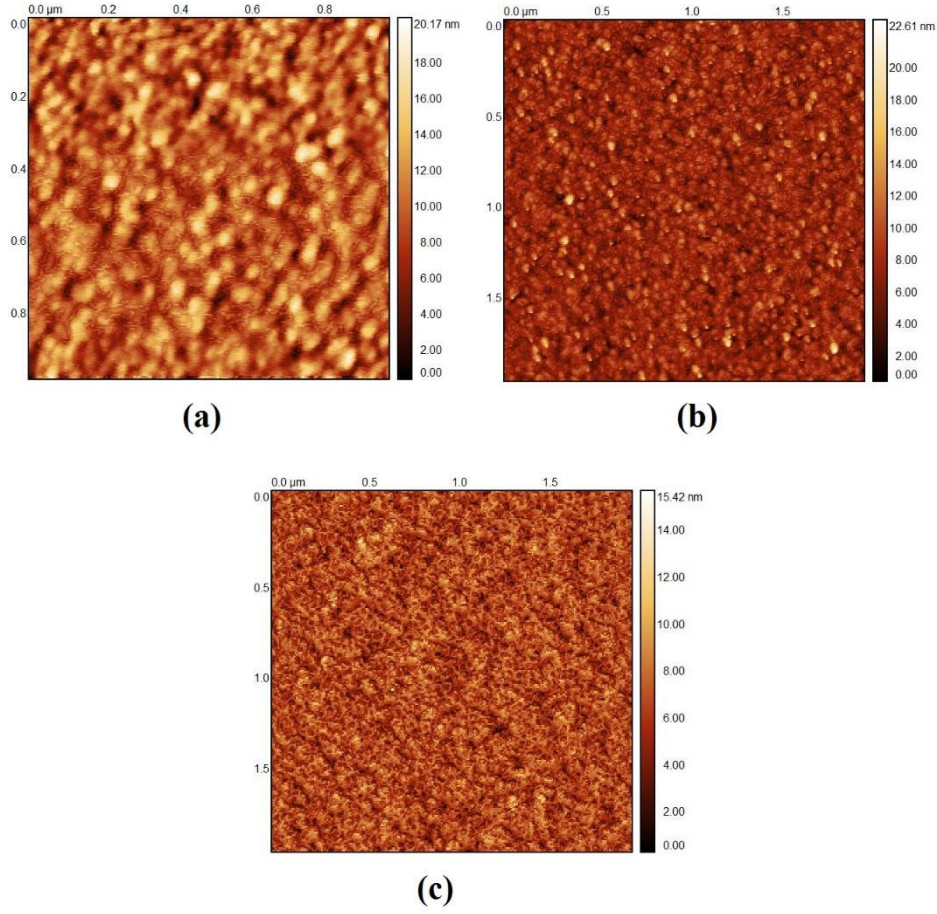
Isıl işlem uygulanmış ZnO ince filmlerin SEM görüntülerinden yararlanılarak yapılan parçacık boyutu analizi Şekil 61’de gösterilmiştir. 100 nm kalınlıkta büyütülen ZnO ince filmlerin parçacık boyutu ısıtıl işlem öncesinde ~33 nm olarak hesaplanmıştı. Isıl işlem sonrasında ise 400 °C için ~63 nm, 500 °C için ~97 nm, 600 °C için ~103 nm ve 700 °C için ~175 nm olarak bulunmuştur. Parçacık boyutu analizinden ısıtıl işlem sıcaklığının artması ile parçacık boyutlarının arttığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 61. Isıl işlem sonrası ZnO ince filmlerin parçacık boyutu analizi

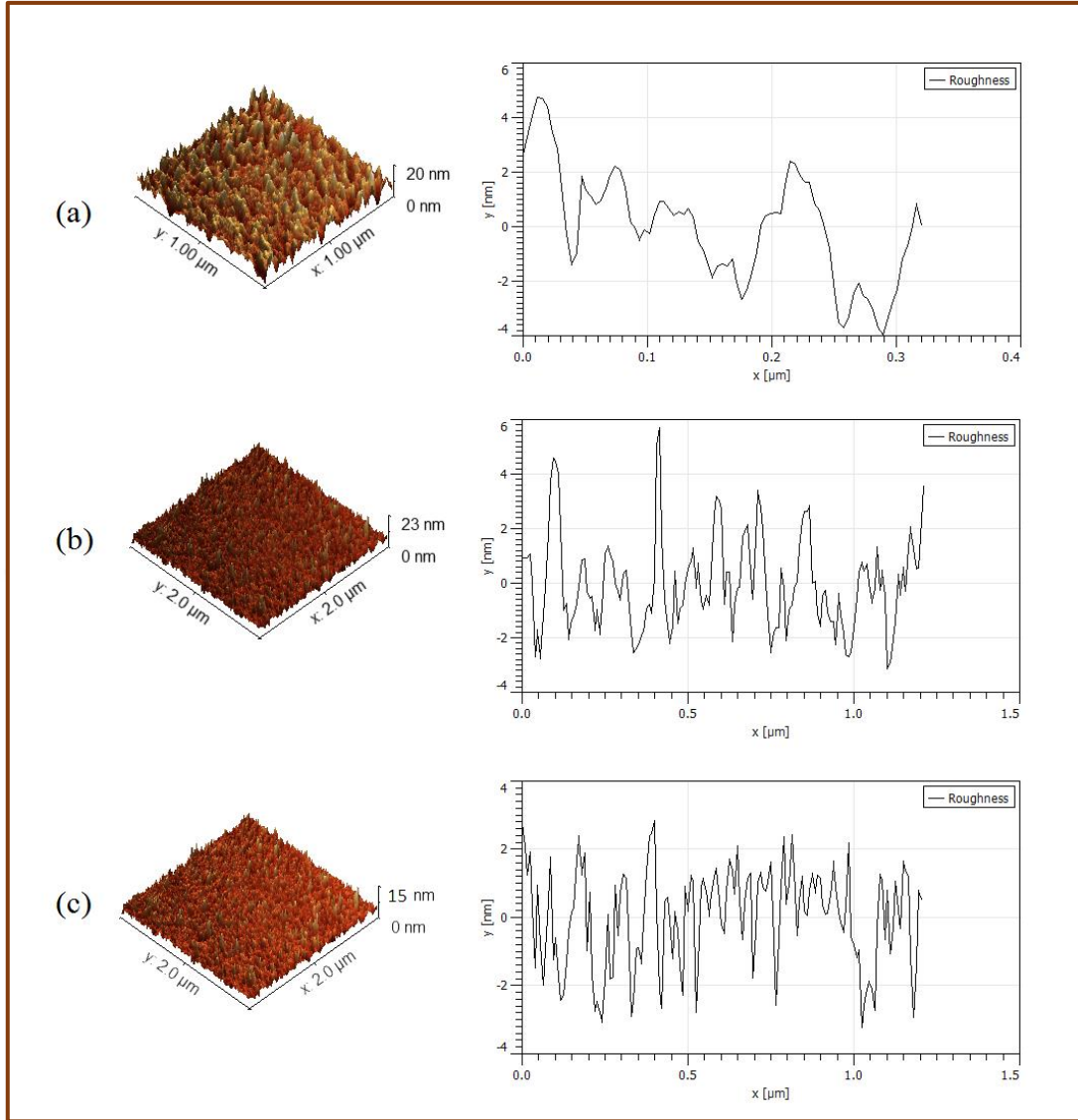
6.3.3. Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları

Isıl işlem uygulan 100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı ve 100 nm kalınlıkta büyütülen ZnO ince filmlerin AFM görüntüsü alınmıştır. Şekil 62a'da 500 °C, Şekil 62b'de 600 °C ve Şekil 62c'de 700 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmlerin AFM görüntüleri gösterilmiştir. AFM görüntülerinden ısıtıl işlem uygulanan filmlerin yüzey morfolojisinde parçacıkların homojen ve küresel yapıda olduğu artan sıcaklıkla birlikte ise parçacık büyüklüklerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar SEM'den elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir.



Şekil 62. a) 500 °C, b) 600 °C, c) 700 °C ısıtma işlemi uygulanan ZnO ince filmlerin AFM görüntüsü

Şekil 63a'da 500 °C, Şekil 63b'de 600 °C ve Şekil 63c'de 700 °C ısıtma işlemi uygulanmış ince filmlerin 3 boyutlu AFM görüntüleri ve topografi-yüzey pürüzlülük grafikleri verilmiştir. Topografi-yüzey pürüzlülüğü grafiklerinden yüzey pürüzlülük değerleri 500 °C için 1,2 nm, 600 °C için 1,3 nm ve 700 °C için 1,9 nm olduğu bulunmuştur. Önceki kısımlarda ısıtma işlemi öncesinde yüzey pürüzlülük değerini 1,1 nm olarak bulmuştuk. Elde edilen verilerden ısıtma işlemi sıcaklığının artmasının yüzey pürüzlülük değerini arttırdığı görülmektedir.



Şekil 63. a) 500 °C, b) 600 °C, c) 700 °C ısıt işlem uygulanan ZnO ince filmlerin 3 boyutlu AFM görüntüsü ve topografi-yüzey pürüzlülüğü grafikleri

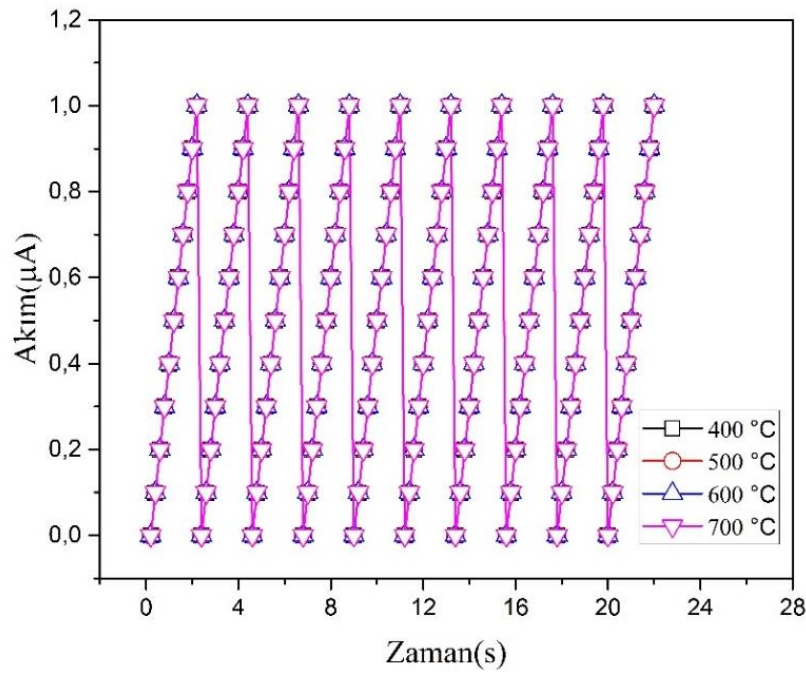
6.3.4. Isıl İşlem Uygulanan ZnO İnce Filmlerin Elektriksel Sonuçları

100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı ve 100 nm kalınlıkta büyütülen ZnO ince filmlere 400 °C, 500 °C, 600 °C ve 700 °C ısıt işlem uygulandıktan sonra elektriksel özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla Van Der Pauw tekniği ile direnç ölçümü yapılmıştır. Tablo 6'da ısıt işlem sonrası ZnO ince filmlerin özdirenç değerleri verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi ısıt işlem sıcaklığı ile birlikte ince filmlerin özdirençleri azalmıştır.

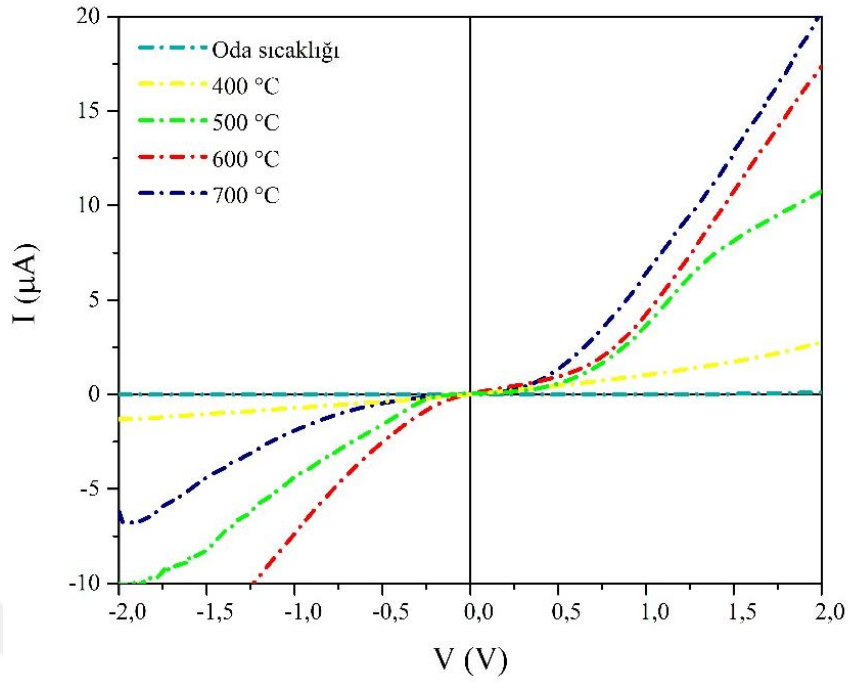
Tablo 6. ZnO ince filmlerin öz direnç hesaplamaları

ZnO İnce Film	
100 nm – Oda sıcaklığı	$1,6 \times 10^{-10} \Omega$
100 nm - 400 °C	$5,5 \times 10^{-9} \Omega$
100 nm - 500 °C	$3,0 \times 10^{-9} \Omega$
100 nm - 600 °C	$2,7 \times 10^{-9} \Omega$
100 nm - 700 °C	$2,4 \times 10^{-9} \Omega$

Isıl işlem sonrası filmlerin akım-gerilim karakteristikleri incelenmiştir. Isıl işlem uygulanan ZnO ince filmlerin Şekil 64'te akım-zaman grafiği ve Şekil 65'te akım-gerilim grafiği verilmiştir.



Şekil 64. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanmış ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği



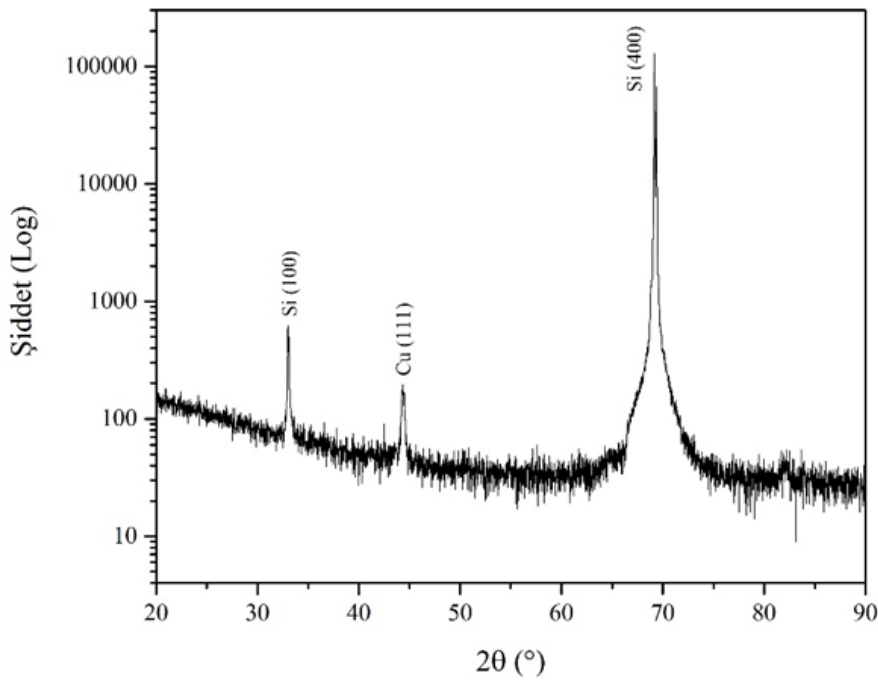
Şekil 65. Farklı sıcaklıklarda ısıtılmış ZnO ince filmlerin akım-gerilim grafiği

Farklı ısıtılmış sıcaklıklarında büyütülen ZnO ince filmlerin akım-zaman grafiği (Şekil 64) incelendiğinde ısıtılmış öncesinde elde edilen sonuçlara benzer olarak uygulanan gerilimlere karşın elde edilen akım değerleri zamana bağlı olarak yaklaşık aynı değerler elde edildiğinde bulunmuştur. Bu durumda örnek yüzeyindeki elektriksel saçılma noktalarının homojenliğinin korunduğunu göstermektedir. Şekil 65'te verilen akım-gerilim grafiği incelendiğinde ise ısıtılmış uygulanmamış olan ince filmde -2 V ile +2 V gerilim aralığında akımın en düşük olduğu görülmektedir. Isıtılmış sıcaklığı yükseldikçe yapı içerisindeki kristallenme miktarı arttığı için akım değeri de artmıştır. Akım değeri artınca direnç değeri ters orantılı bir şekilde azalmıştır. Böylece en uygun ısıtılmış sıcaklığı 700 °C olarak belirlenmiştir. Elektriksel ölçümlerin temel amacı zamana bağlı elektriksel özelliklerin tekrarlanabilirliklerini göstermektir.

6.4. Bakır (Cu) İnce Film Elektrot

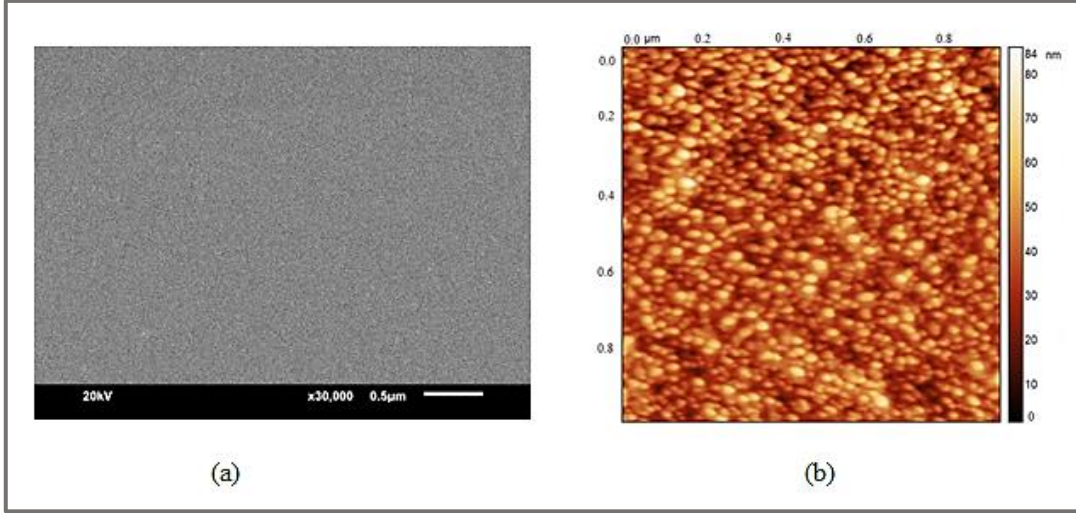
Triboelektrik katman olarak kullanılacak ZnO ince filmin katmanları arasındaki elektriksel iletkenliğin sağlanabilmesi için elektrot ile kaplanması gerekmektedir. Elektrot olarak kullanılan bakırın, triboelektrik katman ile

birleştirilmeden önce bazı yapısal özellikleri incelenmiştir. Oda sıcaklığında 50 W sıçratma gücünde, 5 mTorr sıçratma basıncında ve 200 nm kalınlıkta bakır ince film elektrot üretilmiştir. Bakır elektrotun kalınlığının üretilen ZnO ince filmin kalınlığından büyük olması gerekmektedir. Bunun için literatür araştırması sonucunda kalınlık 200 nm seçilmiştir (Zhang vd., 2020). Şekil 66’da bakır elektrotun X-ışını kırınım deseni verilmiştir. Bakır elektrotun X-ışını kırınım deseni incelendiğinde $2\theta = 20^\circ$ ile 90° arasında alınan ölçüm sonucunda 2θ yaklaşık 44° iken bakır elektrotun kübik yapının (111) fazına ait kristallenme piki gözlemlenmiştir.



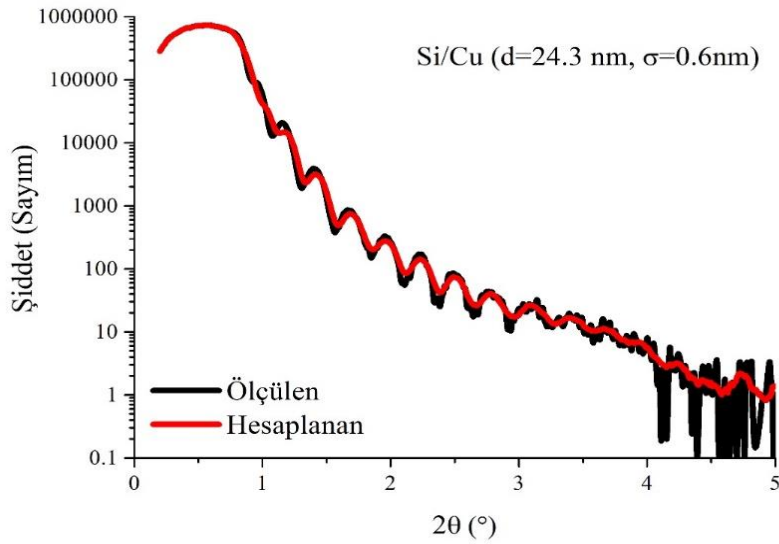
Şekil 66. Bakır elektrotun XRD kırınım deseni.

Bakır elektrot ince filmin 30.000 birim büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 67a’da, $1 \times 1 \mu\text{m}$ boyutlarında alınan atomik kuvvet mikroskobu görüntüsü ise Şekil 67b’de verilmiştir.



Şekil 67. Bakır ince film elektrotun **a)** SEM görüntüsü, **b)** AFM görüntüsü

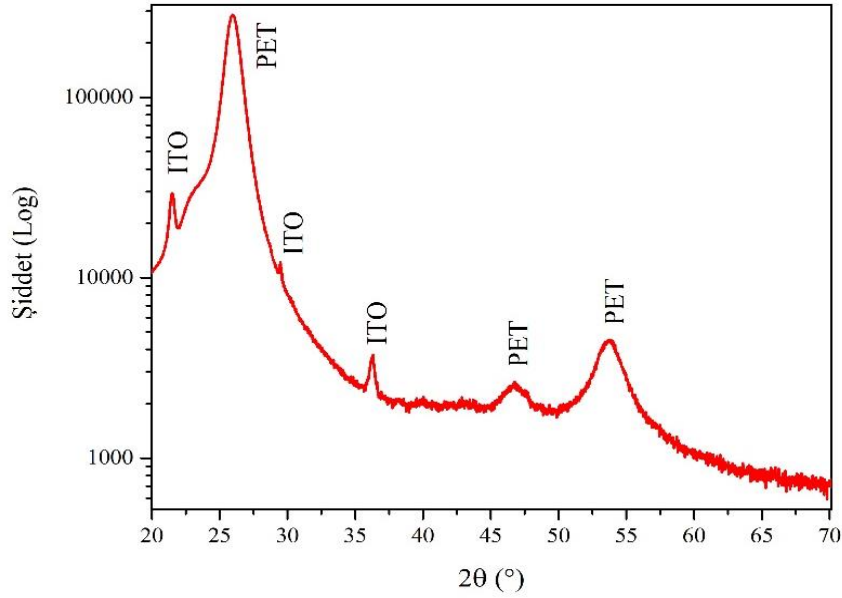
Bakır elektrot ince filmin SEM ve AFM görüntüsünden yüzeylerin küresel yapıda ve homojen olduğu görülmektedir. Cu elektrotun kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi için X-ışını reflektometre ölçümleri alınmıştır. Şekil 68’de Cu elektrot ince filmin XRR sonuçları verilmiştir. Elde edilen verilerden Cu ince film elektrotun yaklaşık olarak kalınlığı (d) 24,3 nm ve yüzey pürüzlülüğü (σ) 0,6 nm olarak bulunmuştur.



Şekil 68. Cu elektrot ince filmin XRR sonuçları

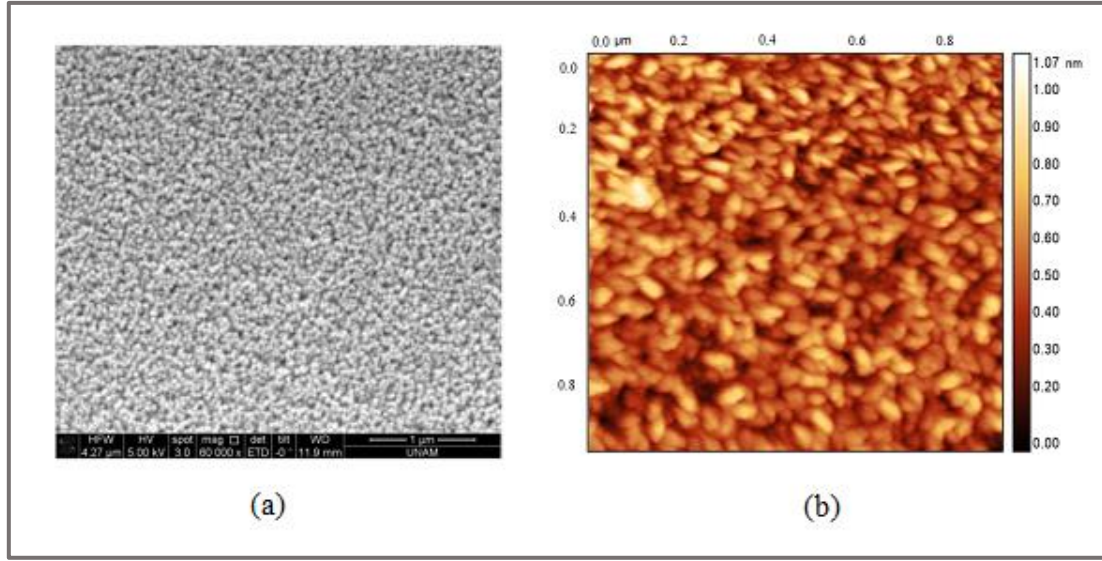
6.5. İndiyum Kalay Oksit (ITO) - Polietilen Tereftalat (PET) Katman

Triboelektrik mekanizmasında ikincil sürtünme katmanı olarak ITO (indiyum kalay oksit) kaplı PET (polietilen tereftalat) kullanılmıştır. ITO nanoparçacıklar şeffaf ve yüksek elektriksel geçirgenliğe sahiptirler. Elektrik direnci çok düşük olduğundan elektrik yükü hareketi kolaydır. Bu özellikleri elektriksel alanlarda tercih edilmesini sağlamıştır. Satın alınan ITO-PET'in yapısal özelliklerinin incelenebilmesi ve literatürle uyumlu olup olmadığının belirlenebilmesi için $2\theta = 20-70^\circ$ arasında X-ışını kırınım deseni alınmıştır. Şekil 69'da ITO kaplı PET'in XRD deseni gösterilmiştir. ITO kaplı PET elektrotun X-ışını kırınım deseni incelendiğinde ITO ve PET'e ait kırınım piklerine rastlanmaktadır.



Şekil 69. ITO-PET X-ışını kırınım deseni

ITO-PET'in Şekil 70a'da 60.000 birim büyütmede alınan taramalı elektron mikroskobu ve Şekil 70b'de atomik kuvvet mikroskobu görüntüsü verilmiştir. ITO kaplı PET elektrotun SEM ve AFM görüntüsü incelendiğinde yüzeylerin konik yapıda ve homojen olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla yapılacak çalışma için alınan ITO-PET'in özelliklerinin uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 70. ITO kaplı PET elektrotun **a)** SEM görüntüsü, **b)** AFM görüntüsü

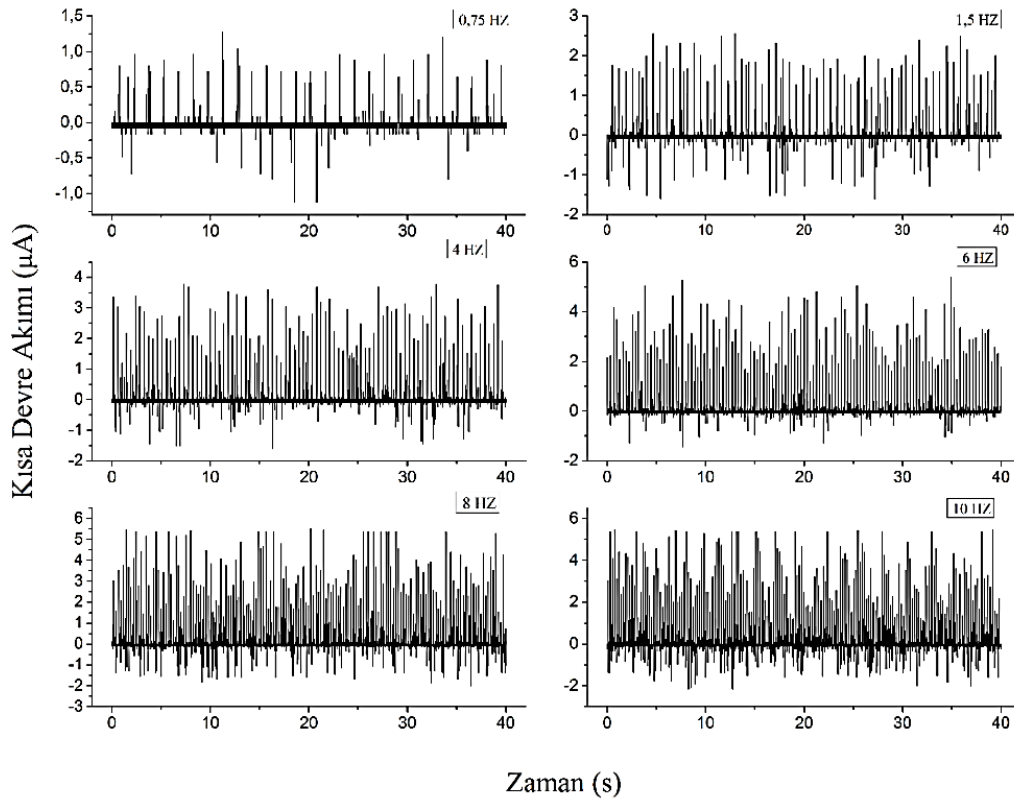
6.6. Triboelektrik Ölçüm Sonuçları

Bu kısımda ısıtılmış ve ısıtılmamış üretilen ZnO ince filmlerin kullanıldığı TENJ cihazı ile açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri ölçülmüştür. Ölçülen akım değerlerinden yararlanılarak TENJ'lerin yük grafikleri elde edilmiştir. Triboelektrik veri alımı farklı frekans değerlerinden elde edilmiştir. Tampon tabaka olarak ince filmlerin altına bakır kaplanmış ve gümüş bant yardımıyla elektriksel devre osiloskopa bağlanmıştır. Sonrasında ITO-PET sürtünme tabakası ile birlikte triboelektrik ölçüm mekanizmasına yerleştirilmiştir. Dikey temas modu kullanılan mekanizma ile akım-gerilim ve elektriksel yük ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

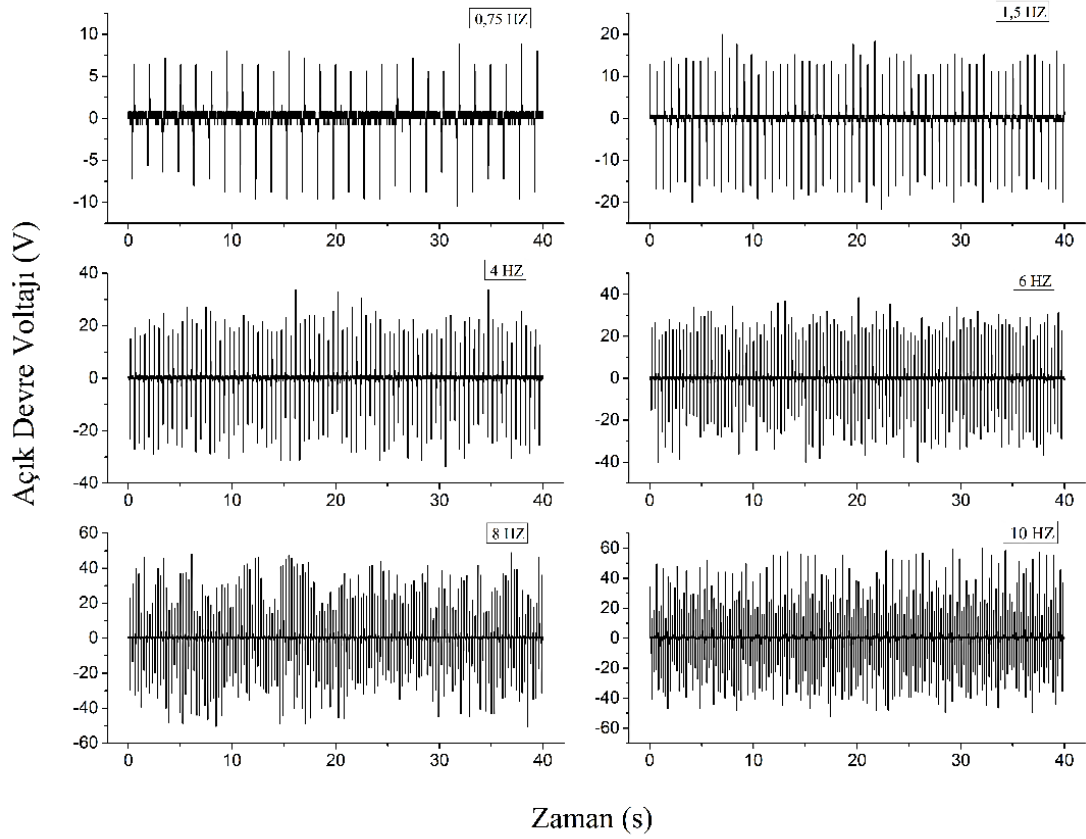
6.6.1. Akım-Gerilim Ölçümleri

Triboelektriklenmenin temelini triboelektrifikasyon ve elektrostatik indüksiyon oluşturmaktadır. Bundan dolayı nanojeneratörlerin düşük frekanslarda çalışma potansiyeli oldukça önemlidir. Yapılan tez çalışmasında ısıtılmış ve ısıtılmamış üretilen ZnO ince filmlerin kullanıldığı TENJ cihazı ile 0,75 Hz, 1,5 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz ve 10 Hz frekans aralığında ölçümler alınmıştır. Isıtılmış ve ısıtılmamış üretilen Cu kaplı ZnO ince filmlerden oluşan katman ile ITO-PET katman TENJ dikey temas çalışma modu ile çalıştırılarak kısa devre akım ve açık devre voltaj eğrileri incelenmiştir.

Oda sıcaklığında üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazından elde edilen kısa devre akım eğrisi Şekil 71’de açık devre voltaj eğrisi ise Şekil 72’de verilmiştir. Kısa devre akım eğrisi (Şekil 71) incelendiğinde artan frekansla birlikte kısa devre akımının arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında kısa devre akımı yaklaşık 1,2 μA civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 5,44 μA olarak ölçülmüştür. Açık devre voltaj eğrisi (Şekil 72) incelendiğinde ise artan frekansla birlikte açık devre voltajının da arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında açık devre voltajı yaklaşık 8 V civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 60 V olarak ölçülmüştür.

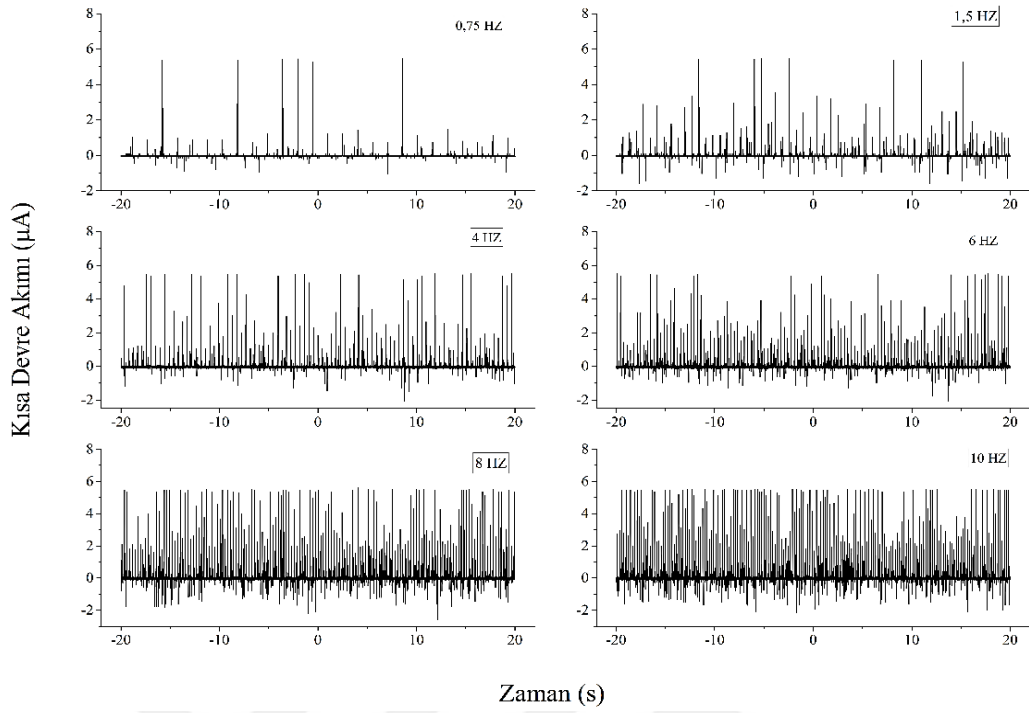


Şekil 71. Farklı frekans aralığında oda sıcaklığında üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ’in kısa devre akım eğrisi

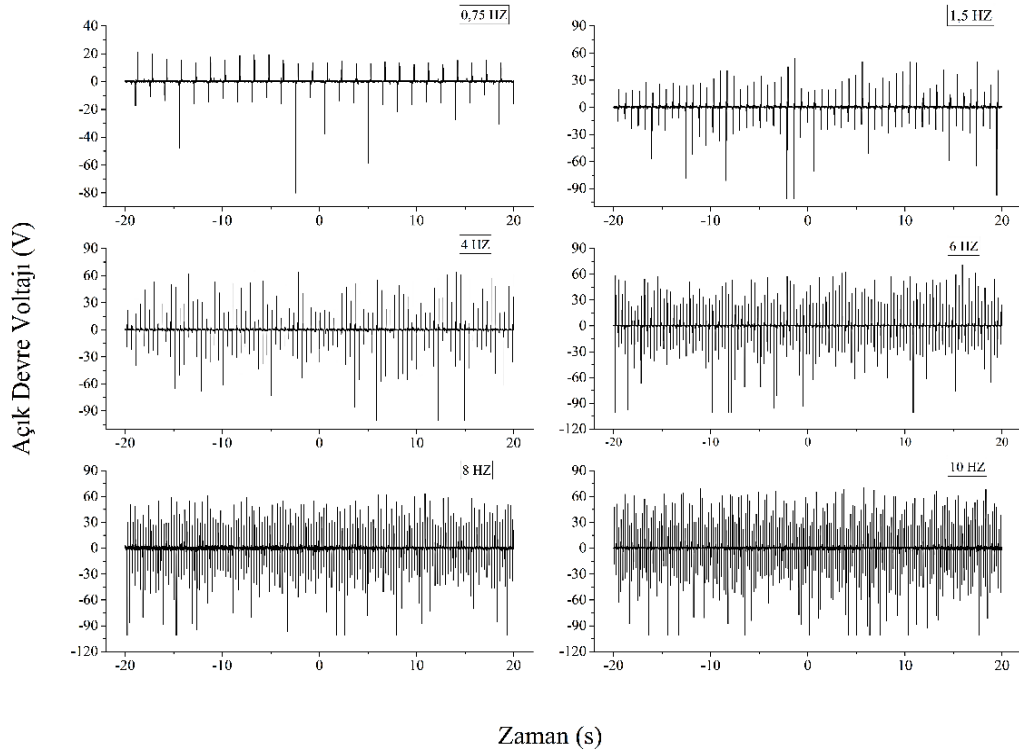


Şekil 72. Farklı frekans aralığında oda sıcaklığında üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi

400 °C ısıtım işlemi uygulanarak üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazından elde edilen kısa devre akım eğrisi Şekil 73'te, açık devre voltaj eğrisi ise Şekil 74'te verilmiştir. Kısa devre akım eğrisi (Şekil 73) incelendiğinde frekans arttıkça kısa devre akımının arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında kısa devre akımı yaklaşık 2 μA civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 5,52 μA 'dır. Açık devre voltaj eğrisi (Şekil 74) incelendiğinde ise frekans arttıkça açık devre voltajının da arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında açık devre voltajı yaklaşık 20 V civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 65 V olarak ölçülmüştür.

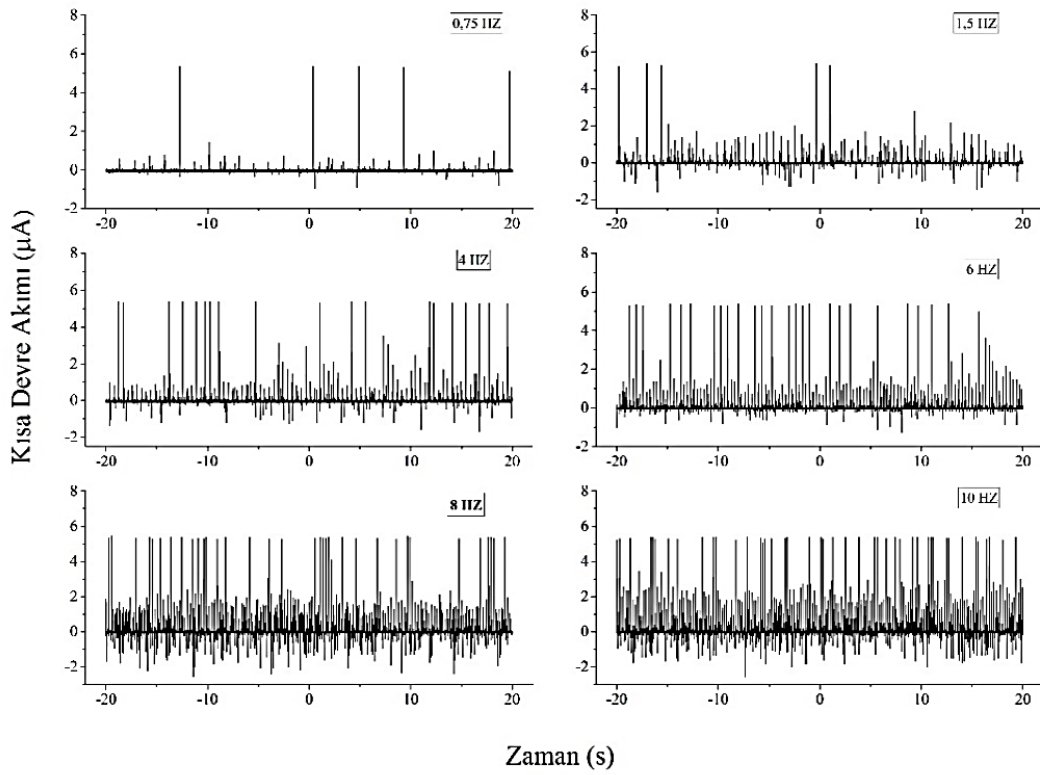


Şekil 73. Farklı frekans aralığında 400 °C ısıtıl işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akımı eğrisi

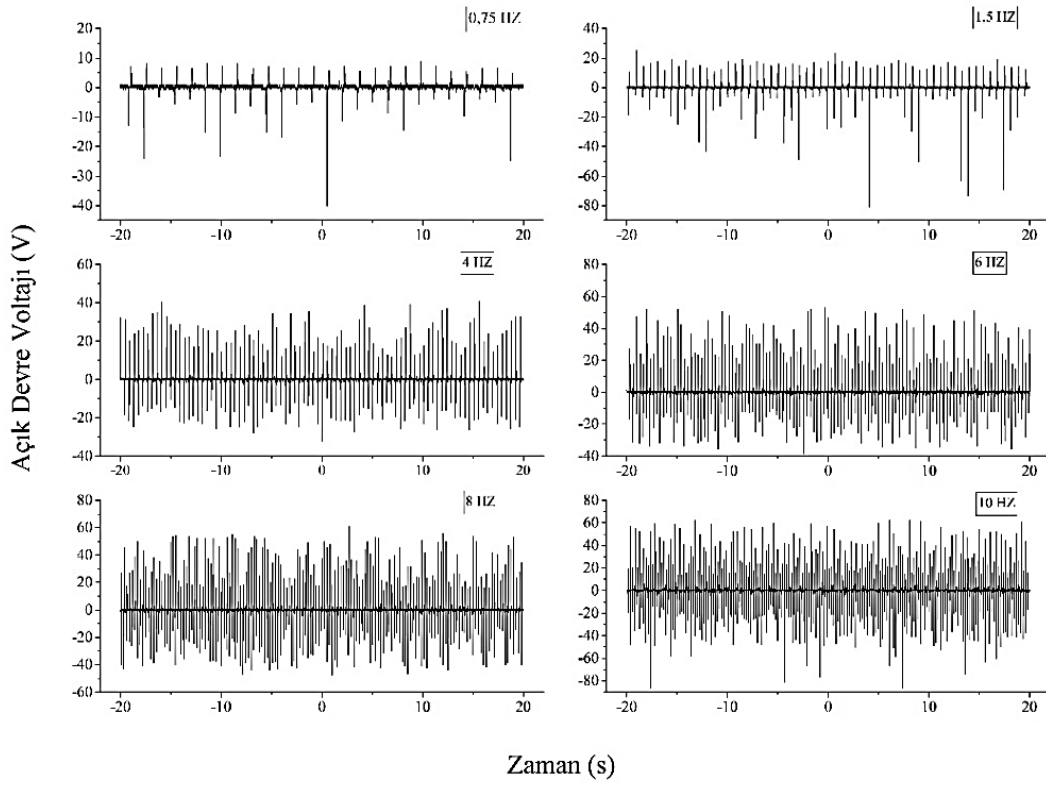


Şekil 74. Farklı frekans aralığında 400 °C ısıtıl işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi

500 °C ısıtıl işlem uygulanarak üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının kısa devre akım eğrisi Şekil 75'te, açık devre voltaj eğrisi ise Şekil 76'da verilmiştir. Kısa devre akım eğrisi (Şekil 75) incelendiğinde frekans arttıkça kısa devre akımının arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında kısa devre akımı yaklaşık 3 μA civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 5,36 μA 'dır. Açık devre voltaj eğrisi (Şekil 76) incelendiğinde ise frekans arttıkça açık devre voltajının da arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında açık devre voltajı yaklaşık 15 V civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 62 V olarak ölçülmüştür.

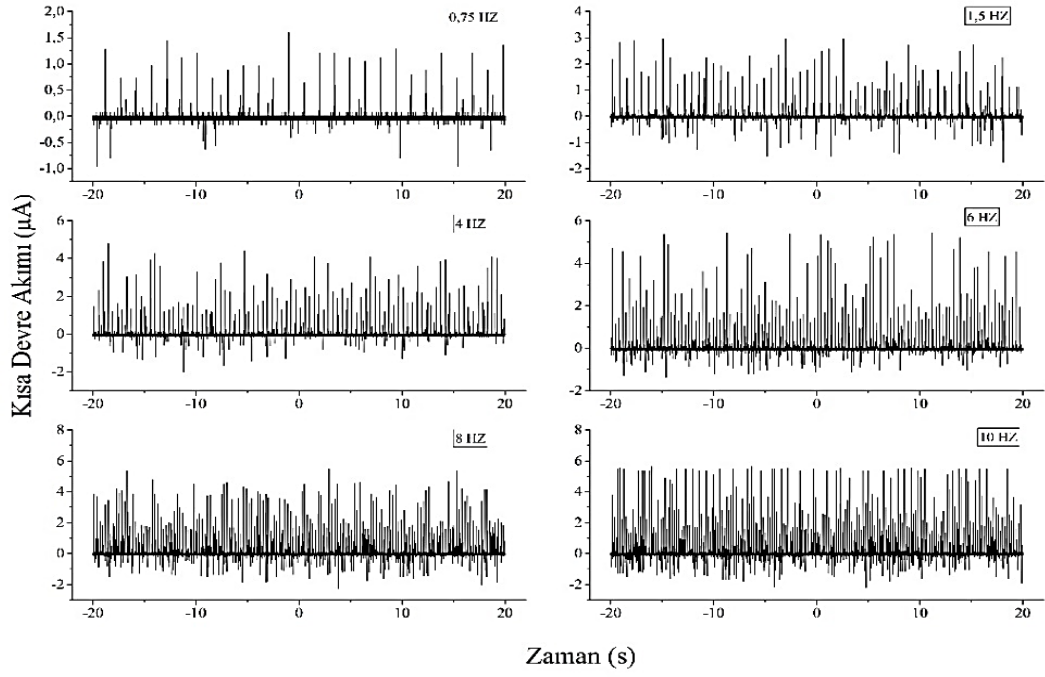


Şekil 75. Farklı frekans aralığında 500 °C ısıtıl işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akımı eğrisi

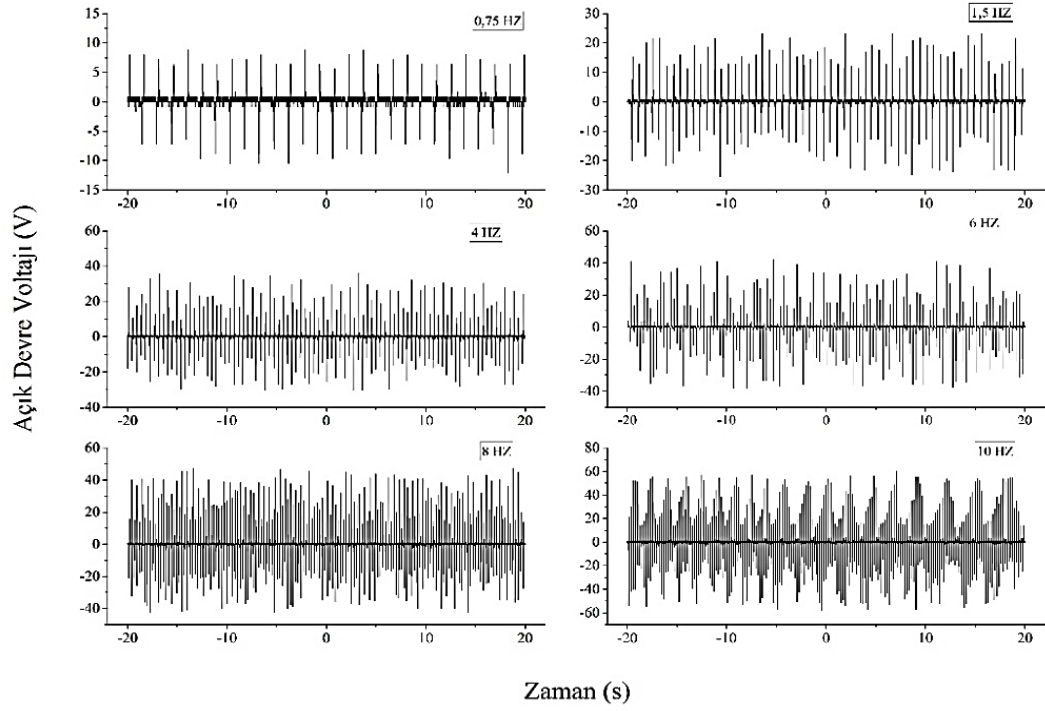


Şekil 76. Farklı frekans aralığında 500 °C ısıt işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi

600 °C ısıt işlem uygulanarak üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazından elde edilen kısa devre akım eğrisi Şekil 77'de, açık devre voltaj eğrisi ise Şekil 78'de verilmiştir. Kısa devre akım eğrisi (Şekil 77) incelendiğinde frekans arttıkça kısa devre akımının arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında kısa devre akımı yaklaşık 1,5 μ A civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 5,52 μ A'dır. Açık devre voltaj eğrisi (Şekil 78) incelendiğinde ise frekans arttıkça açık devre voltajının da arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında açık devre voltajı yaklaşık 10 V civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 60 V olarak ölçülmüştür.

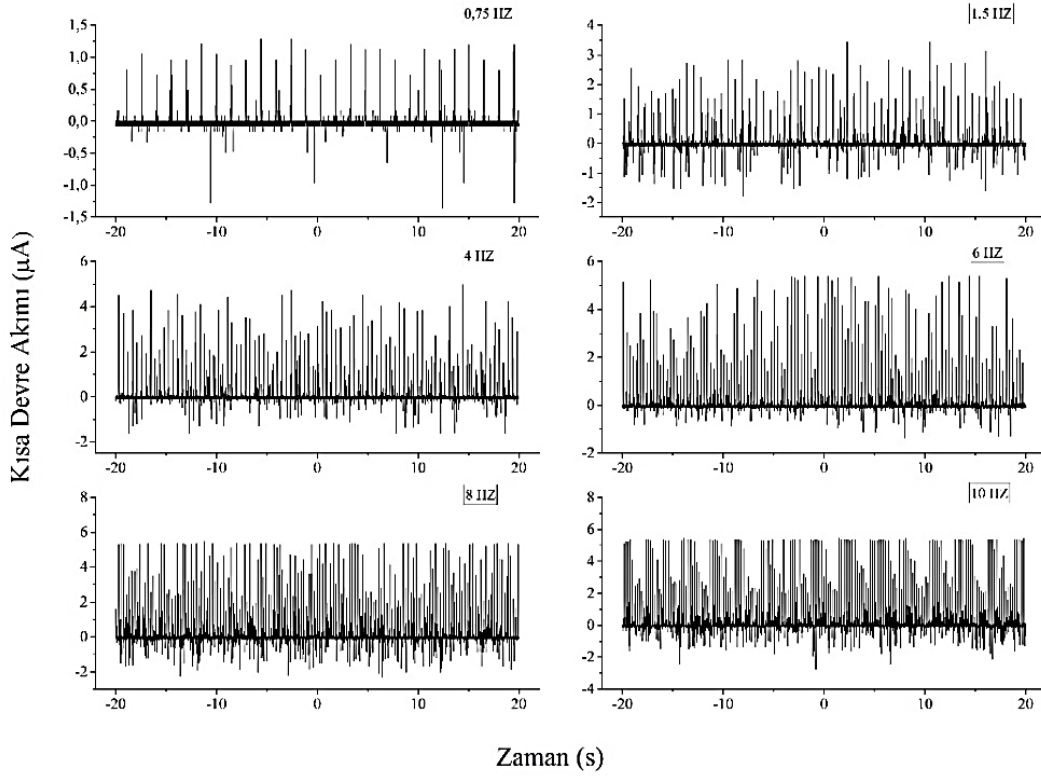


Şekil 77. Farklı frekans aralığında 600 °C ısıt işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in kısa devre akımı eğrisi

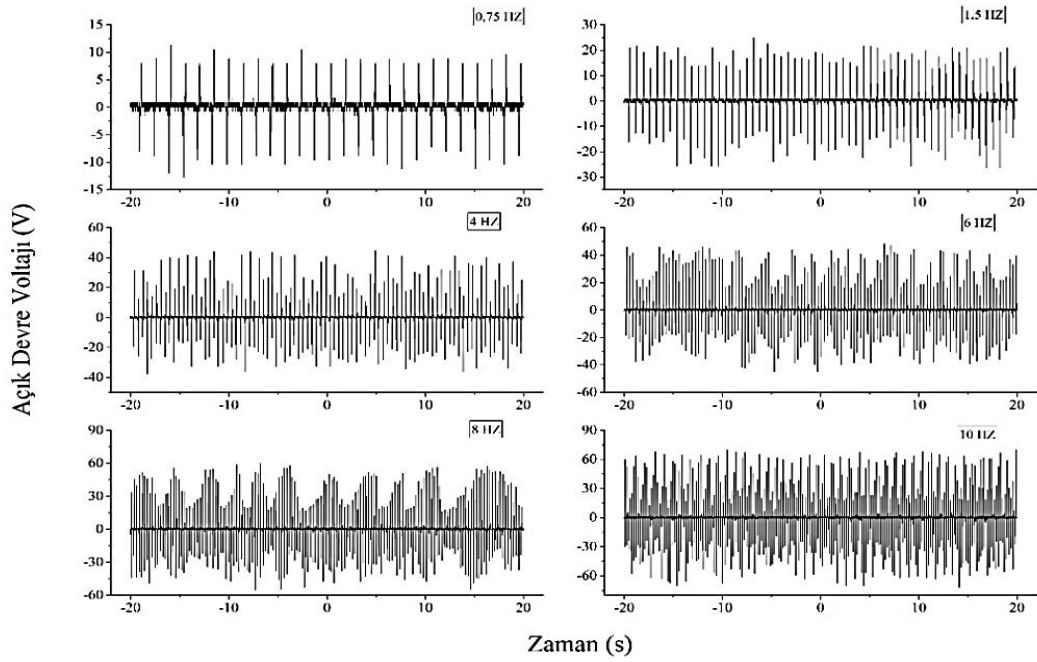


Şekil 78. Farklı frekans aralığında 600 °C ısıt işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi

700 °C ısıt işlem uygulanarak üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazından elde edilen kısa devre akım eğrisi Şekil 79’da açık devre voltaj eğrisi ise Şekil 80’de verilmiştir. Kısa devre akım eğrisi (Şekil 79) incelendiğinde frekans arttıkça kısa devre akımının arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında kısa devre akımı yaklaşık 1,5 μ A civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 5,36 μ A’dir. Açık devre voltaj eğrisi (Şekil 80) incelendiğinde ise frekans arttıkça açık devre voltajının da arttığı görülmektedir. 0,75 Hz frekans aralığında açık devre voltajı yaklaşık 10 V civarındayken 10 Hz frekans aralığında bu değer yaklaşık 70 V olarak ölçülmüştür.



Şekil 79. Farklı frekans aralığında 700 °C ısıt işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ’in kısa devre akım eğrisi



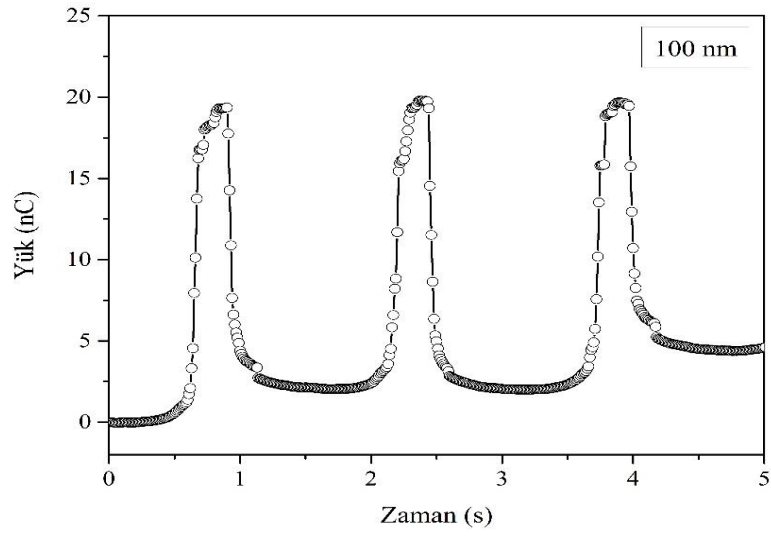
Şekil 80. Farklı frekans aralığında 700 °C ısıtıl işlem uygulanarak üretilen ZnO ince film-Cu katman ile ITO-PET katmandan oluşan TENJ'in açık devre voltajı eğrisi

6.6.2. Elektriksel Yük Ölçümleri

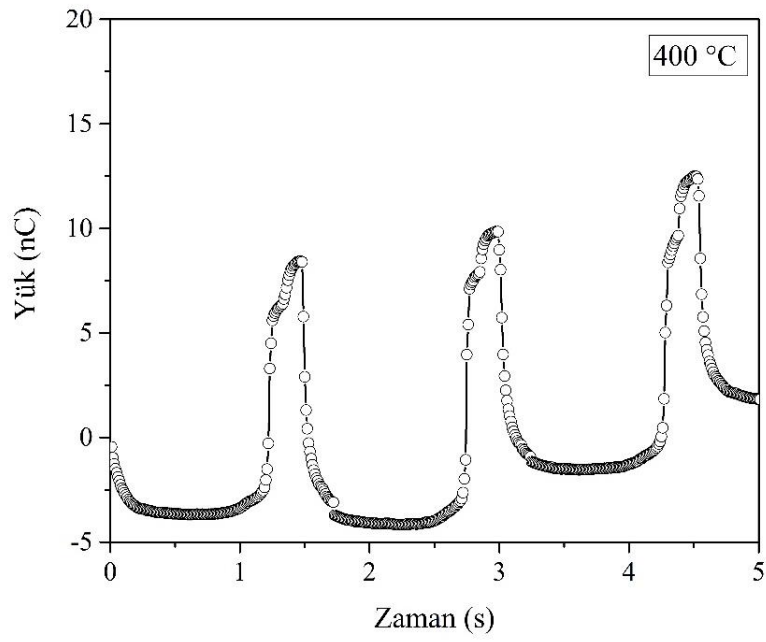
Triboelektrik nanogeneratörlerin oda sıcaklığı ve ısıtıl işlem uygulandıktan sonra yük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Triboelektrik nanogeneratörlerin yapısında bulunan iki dielektrik tabaka birbirleri ile temas ettiği zaman oluşan kontak elektrifikasyonu nedeniyle statik triboelektrik yükler meydana gelmektedir. Coulomb'un yük korunumu yasasına göre her iki elektrotta da toplamda aynı miktarda yük olması gerekmektedir.

$$Q = \int I_{KD} dt \quad (41)$$

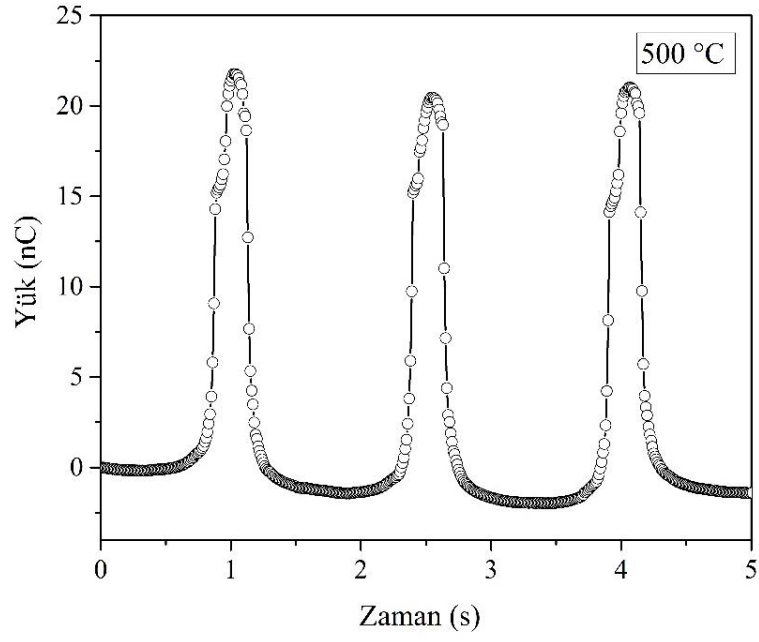
Zamana bağlı kısa devre akım verileri kullanılarak (denklem 41) hazırlanan yük eğrileri ısıtıl işlemsiz ve 400 °C, 500 °C, 600°C ve 700 °C ısıtıl işlemli filmler için sırasıyla Şekil 81, Şekil 82, Şekil 83, Şekil 84 ve Şekil 85'te verilmiştir. Burada Q yükü, I_{KD} ise kısa devre akımını ifade etmektedir.



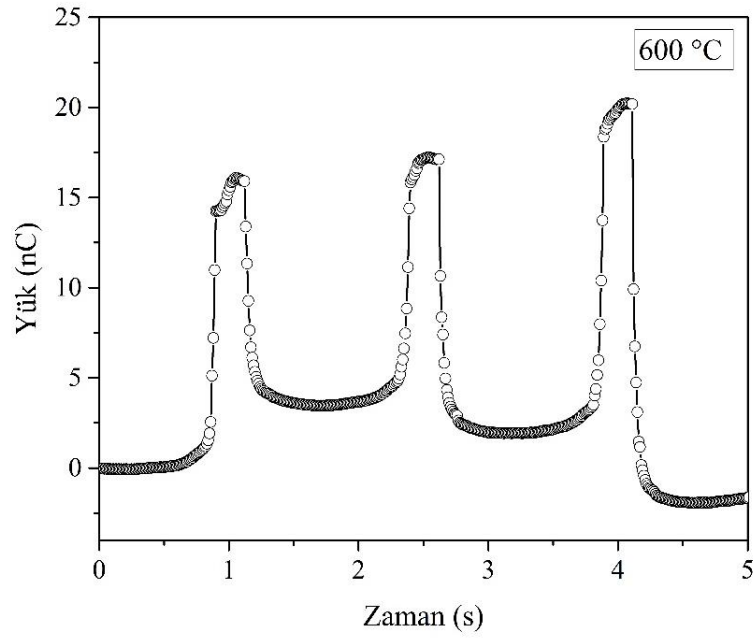
Şekil 81. Oda sıcaklığında üretilen ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi



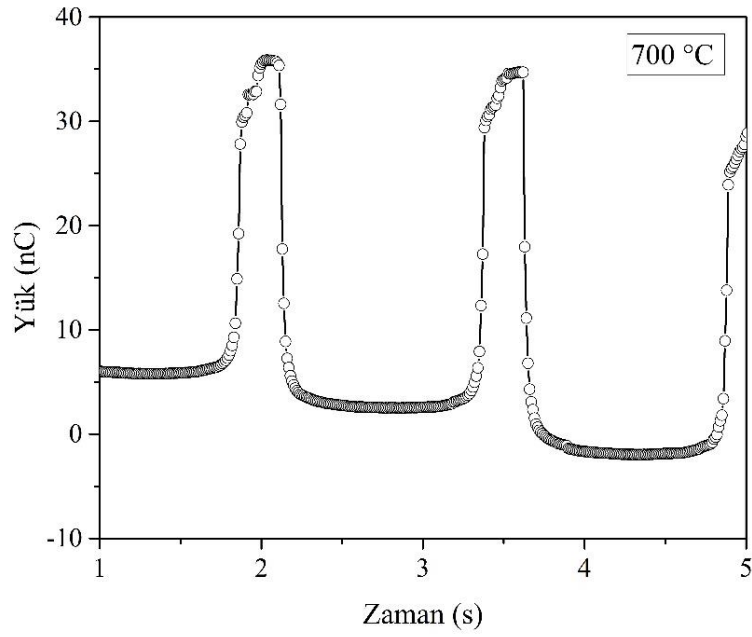
Şekil 82. 400 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi



Şekil 83. 500 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi



Şekil 84. 600 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi



Şekil 85. 700 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazının zamana bağlı yük eğrisi

Yük zaman eğrilerinden yararlanılarak Cu kaplı ZnO ve ITO-PET katmandan oluşan TENJ cihazlarının maksimum yük değerleri bulunmuştur. Elde edilen maksimum yük değerleri Tablo 7’de verilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi en fazla yük değeri 700 °C ısıtıl işlem uygulanan ZnO ince filmin kullanıldığı TENJ cihazından elde edilmiştir.

Tablo 7. TENJ cihazlarından elde edilen en yüksek yük değerleri

Örnek	En Yüksek Yük (nC)
Isıl İşlemsiz ZnO	20
400 °C Isıl İşlemlı ZnO	13
500 °C Isıl İşlemlı ZnO	23
600 °C Isıl İşlemlı ZnO	21
700 °C Isıl İşlemlı ZnO	35

7. SONUÇ

Triboelektrik nanogeneratörler elektronik cihazlara güç sağlamak için kullanılan güvenilir, düşük maliyetli, yüksek çıkış performansına sahip çevre dostu mekanizmalardır. Yapılan tez çalışmasında ZnO filmlerin yapısal, elektriksel ve triboelektrik değerleri farklı sıçratma basınçlarında, farklı güçlerde ve farklı ısıtma sıcaklıklarında yarıiletken tabakalar halinde elde edilerek değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucuna göre, ZnO yarıiletken katmanları, gelecekteki geliştirilecek olan triboelektrik araştırmalarında tercih edilen bir sürtünme katmanı olarak kullanılabilir.

Tasarlanan TENJ cihazında tribo sürtünme katmanlarını ITO-PET ve ZnO-Cu oluşturmaktadır. Burada ITO ve Cu elektrot, PET pozitif yüklenen malzeme ve ZnO negatif yüklenen malzeme olarak kullanılmıştır. Dikey temas ile triboelektrikleymeye dayalı olarak ölçümler alınmıştır. Manyetik alanda sıçratma sistemi ile Si(100) tek kristal alttaş üzerine büyütülen ZnO ince filmlerden en iyi özellik gösteren 100 W sıçratma gücü, 8 mTorr sıçratma basıncı, %5 kısmi O₂ basıncı ve 100 nm kalınlıkta büyütülen ince film olduğu belirlenmiştir. 100 nm kalınlıkta büyütülen ince filmlere 400 °C, 500 °C, 600 °C ve 700 °C ısıtma işlem uygulanmış ve ısıtma işlemi ile birlikte film özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Isıtma işlem sıcaklığı arttıkça filmlerin daha iyi elektriksel performans ve çıkış sinyaliye sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 8. ZnO ince filmin özellikleri

Örnek	Yapısal Özellik	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)	Parçacık Boyutu (nm)	En Yüksek Yük (nC)
Isıtma İşlemsiz ZnO	Amorf	1,1	33	20
500 °C Isıtma İşlemli ZnO	Wurtzite	1,2	97	23
600 °C Isıtma İşlemli ZnO	Wurtzite	1,3	103	21
700 °C Isıtma İşlemli ZnO	Wurtzite	1,9	175	35

Tablo 8’de ZnO ince filmlerin yapılan ölçümler sonucunda elde edilen bazı özelliklerine yer verilmiştir. Tablo 8’de görüldüğü gibi ısıtma işlem sıcaklığının artması ile birlikte kristallenmeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve parçacık boyutu değeri artmıştır. Bu artışın sebebinin kristal yapının wurtzite olarak oluşturulması ve tercihi yönelimin varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 9. ZnO ince filmlerin kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve güç değerleri

Örnek	Kısa Devre Akımı (A)	Açık Devre Gerilimi (V)	Güç (W/m ²)
Isıl İşlemsiz ZnO	$5,44 \times 10^{-6}$	60	3,26
400 °C Isıl İşlemli ZnO	$5,52 \times 10^{-6}$	65	3,59
500 °C Isıl İşlemli ZnO	$5,36 \times 10^{-6}$	62	3,32
600 °C Isıl İşlemli ZnO	$5,52 \times 10^{-6}$	60	3,31
700 °C Isıl İşlemli ZnO	$5,36 \times 10^{-6}$	70	3,76

Tablo 9’da ise oda sıcaklığında ve 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C ısıtılarak üretilen ZnO ince filmler kullanılarak dikey temas ile çalıştırılan TENJ cihazlarından ölçülen kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değerleri verilmiştir. Bu değerlerden yararlanarak $\sim 0,01 \times 0,01 \text{ m}^2$ alan için güç hesaplanmıştır. Tablodan görüldüğü gibi en fazla güç değeri 700 °C ısıtılarak üretilen ince filmde bulunmuştur.

Tablo 10. Malzeme FOM'un hesaplama sonuçları

Örnek	Yük Yoğunluğu (C/m ²)	FOM _m ($\times 10^3$)
Isıl İşlemsiz ZnO	$2,0 \times 10^{-4}$	4,51
400 °C Isıl İşlemli ZnO	$1,3 \times 10^{-4}$	1,98
500 °C Isıl İşlemli ZnO	$2,3 \times 10^{-4}$	5,97
600 °C Isıl İşlemli ZnO	$2,1 \times 10^{-4}$	4,98
700 °C Isıl İşlemli ZnO	$3,5 \times 10^{-4}$	13,83

Triboelektrik nanogeneratörlerde malzeme özelliğinin çıkış gücüne katkısını değerlendirmek amacıyla farklı parametrelerde üretilen ZnO ince filmlerin kullanıldığı TENJ’lerin FOM_m değeri hesaplanmıştır. Daha önceki bölümde yer alan denklem 19 vakum geçirgenliğinin etkisi değerlendirilerek denklem 42’ye dönüştürülmüştür (Su, 2017).

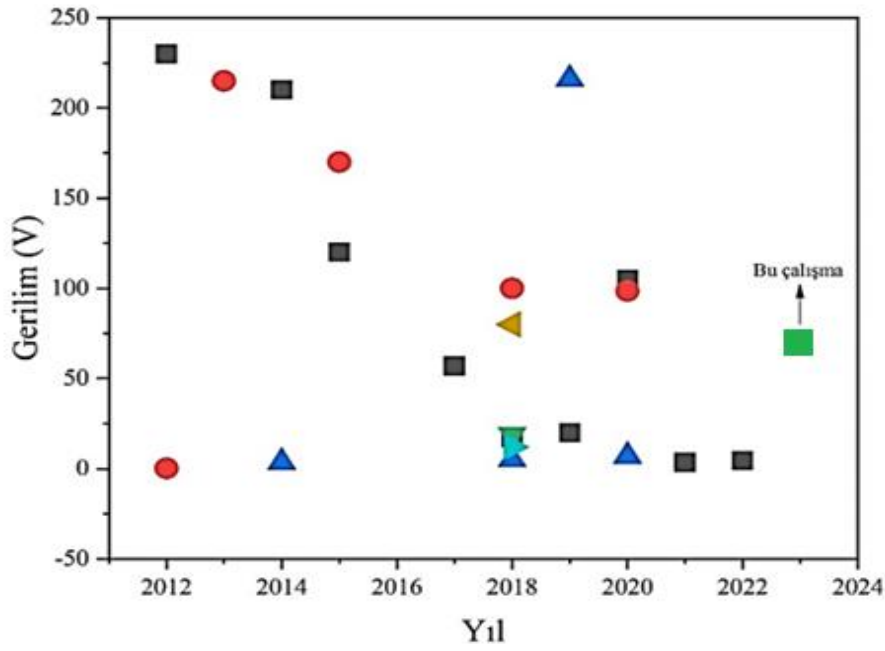
$$\text{FOM}_m = \frac{\sigma^2}{\epsilon_0} \quad (42)$$

Burada; σ ZnO ince filmin yüzey yük yoğunluğu ve ϵ_0 vakumun geçirgenliğidir. FOM_m değerleri $0,01 \times 0,01 \text{ m}^2$ alan için hesaplanmıştır ve Tablo 10’da verilmiştir. ϵ_0 değeri $8,86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ alınmıştır. Sonuç olarak en yüksek performans katsayısı (FOM_m) 700 °C ısıtılarak üretilen ZnO ince filmde elde

edilmiştir. Oda sıcaklığında amorf yapıda elde edilen ZnO ince filmlerin FOM değeri 400 °C ve 500 °C'den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun olası sebebinin 400 °C ve 500 °C'de kristalleşmenin yanında amorf bir bileşen bulunurken, oda sıcaklığında sadece amorf yapının gözlemlenmesidir. Böylelikle elektriksel iletkenliği sağlayan mekanizmanın iki farklı bileşenden saçılma olasılığının bir bileşene göre daha fazla olduğu söylenebilir. Bu durum kristalitenin yani yüksek oranda wurtzite yapının tek bileşenli olan örneklerde (600 °C ve 700 °C) ve amorfun olduğu örnekler için FOM değerinin daha yüksek olmasıyla kanıtlanmaktadır. ZnO ince filmler için yüzey yük yoğunluğu daha önce yapılan bir çalışmada $1,9 \times 10^{-3}$ ile $6,5 \times 10^{-3}$ C/m² arasında bulunmuştur (Su, 2017).

Tablo 11. TENJ'lerin çıkış gerilimi ve güç çıktılarının yıllara göre karşılaştırılması

Referans	Güç Çıktısı	Gerilim (V)
(Zhu vd., 2012)	31,2 mW/cm ²	110
(Wang vd., 2012)	128 mW/cm ²	230
(Zhu vd., 2013)	31,3 mW/cm ²	1200
(Bai vd., 2013)	9,8 mW/cm ²	215
(Zhu vd., 2013)	-	220
(Wang vd., 2013)	5,3 mW/cm ²	1300
(Yang vd., 2013c)	0,05 mW/cm ²	1000
(Huang vd., 2014)	2,1 mW	210
(Zhu vd., 2014)	19 mW/cm ²	850
(Ko vd., 2014)	-	3,62-5,34
(Seung vd., 2015)	1,1 mW	120-170
(Yue vd., 2015)	1,1 mW/cm ²	-
(Yue vd., 2015)	23,75 µW/cm ²	-
(Pu vd., 2016)	0,32 mW/cm ²	-
(Deng vd 2017)	1,1 W/m ²	57
(Dong vd., 2017)	0,026 mW/cm ²	-
(Wu vd., 2018)	-	17-100
(Jeon vd., 2018a)	-	80
(Chen vd., 2018)	-	12
(Xia vd., 2019)	4,67 mW	392
(Song vd., 2019)	0,3 mW	305
(Li vd., 2020)	-	105
(Jeon vd 2020)	-	98,4
(Tantraviwat vd., 2020)	0,58 W/m ²	3200
(Gupta vd., 2020)	-	7
(Dos Santos vd., 2021)	-	3,5
(Supraja vd., 2021)	-	4,5
Bu çalışma	3,76 W/m²	70



Şekil 86. Tasarlanan TENJ cihazının literatür ile çıkış gerilimlerinin karşılaştırılması

Tablo 11’de 4. Bölümde bahsedilen literatürde daha önce yapılan çalışmalarda üretilen TENJ’ler ile bu tez çalışmasında üretilen TENJ’nin güç ve gerilim çıktılarının yıllara göre karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 86’da ise elde edilen gerilim değerinin literatürdeki gerilim değerleri ile karşılaştırılması grafik halinde verilmiştir. Literatür incelemelerinden TENJ’lerin performansı yapılarındaki malzemelere bağlı olduğunu malzemenin yüzey yük yoğunluğu ve yüzey alanını arttırmanın TENJ’lerin çıktı performansını arttırdığı görülmüştür. Literatür çıkış verileri incelendiğinde bu tez çalışması sonucunda elde edilen çıktıların literatürle kıyaslanabilir düzeyde olduğu ve geliştirilebileceği öngörülmektedir.



Şekil 87. Tasarlanan TENJ cihazı kullanılarak yakılan LED ışıklar

Yapılan tez çalışmasında tasarlanan dikey temas modu ile çalıştırılan TENJ cihazından en yüksek $\sim 5,36 \mu\text{A}$ akım, $\sim 70 \text{ V}$ gerilim ve $\sim 3,76 \text{ W/m}^2$ güç elde edilmiştir. TENJ ile Şekil 87’de gösterilen gibi seri bağlanmış 83 adet 2,2 V ve 15 mA’lik (2,74 W) yeşil LED ve 14 adet 1,5 V ve 15 mA’lik (0,32 W) kırmızı LED ışık diyotlar çalıştırılabilmektedir.



KAYNAKÇA

- Ahmed, A., Hassan I., El-Kady, M-F. et al. (2019). Integrated triboelectric nanogenerators in the era of the internet of things. Adv. Sci. 6. <https://doi.org/10.1002/advs.201802230>
- Akman, E. (2013). Sol-Jel Yöntemiyle Kalkoprit Cu (Al_xGa_{1-x}) Se₂(CAGS) ince filmlerinin sentezi ve karakterizasyonu. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Konya.
- Aksoy, S. (2006). Kalay katkılı ZnO ince filmlerin bazı özellikleri. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Aktürk, C. (2013). ZnO nano sistemlerinin sentezlenmesi ve manyetik özelliklerinin elektron paramanyetik rezonans (EPR) spektroskopisi ile incelenmesi. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Al, E.B. (2010). Fotovoltaik pillerin yapısı ve akım iletim mekanizması. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Elazığ.
- Algün, G. (2018). ZnO kaplama miktarının n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresinin verimliliğine etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 13(2), 154–163. <https://doi.org/10.29233/sdufeffd.459518>
- Arıç, E. (2010). Nanoyapıda çinko oksit partiküllerinin üretimi ve karakterizasyonu. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Bai, P., Zhu, G., Lin, Z.-H. et al. (2013). Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions. ACS Nano, 7(4), 3713–3719. <https://doi.org/10.1021/nn4007708>
- Bilgin, E.E. (2019). Magnetron sputratma yöntemi ile kaplanmış TiN filmlerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde taban malzeme sıcaklığının etkisi. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Erzincan.
- Chen, S-N., Chen, C-H., Lin, Z-H. et al. (2018). On enhancing capability of tribocharge transfer of ZnO nanorod arrays by Sb doping for anomalous output performance improvement of triboelectric nanogenerators, Nano Energy, 45, (2018) 311–318, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.01.013>
- Cheng, G., Lin, Z-H., Ling, L. et al. (2013). Pulsed nanogenerator with huge instantaneous output power density. ACS Nano, 7(8), 7383–7391. <https://doi.org/10.1021/nn403151t>

- Czternastek, H. (2004). ZnO thin films prepared by high pressure magnetron sputtering. *Opto-Electronics Review*, 12(1), 49–52.
- Çalışkan, H., Kurbanoglu C., Çolak O. (2010). Yüksek güç darbeli magnetron sıçratma ile kaplama üretimi ve kesici takımlar üzerinde uygulamaları. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(4), 57-71.
- Deng, W., Zhang, B., Jin, L. et al. (2017). Enhanced performance of ZnO microballoon arrays for a triboelectric nanogenerator. *Nanotechnology*, 28, 135401. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5f34>
- Dong, K., Deng, J., Zi, Y. et al. (2017). 3D Orthogonal Woven Triboelectric Nanogenerator for Effective Biomechanical Energy Harvesting and as Self-Powered Active Motion Sensors. *Advanced Materials*, 29(38). <https://doi.org/10.1002/adma.201702648>
- Dos Santos, A., Sabino, F., Rovisco, A. et al. (2021). Optimization of ZnO nanorods concentration in a micro-structured polymeric composite for nanogenerators. *Chemosensors*, 9(27), 1–13. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9020027>
- Du, W., Han, X., Lin, L. et al. (2014). A three dimensional multi-layered sliding triboelectric nanogenerator. *Advanced Energy Materials*, 4(11), 1301592. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301592>
- Durak, G. (2010). CoMnGe_{1-x}Ga_x sistemlerinin $0 \leq x \leq 0.1$ bileşikleri için yapısal, ısısal, manyetik ve manyetokalorik özelliklerinin incelenmesi. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Enerji seviyeleri ve band yapıları. (2022). Diyet.net. <http://diyet.net/enerji-seviyeleri-ve-bant-yapilari>. Erişim: 26.01.2022.
- Evans, D. (2011). The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. White Paper, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).
- Fotovoltaik sistem deney föyü. (2022). https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ofenerji_c80d1.doc. Erişim: 20.01.2022.
- Guo, H., He, X., Zhong, J. et al. (2014). A nanogenerator for harvesting airflow energy and light energy. *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 2079–2087.
- Gupta, A.K., Hsu, C-H., Lai, S-N., Lai, C-S. (2020). ZnO-polystyrene composite as efficient energy harvest for self-powered triboelectric nanogenerator. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9, 115019. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/aba7fa>
- Güngör, T., ve Güngör, E. (2022). Yarıiletken aygıt karakterizasyonu için Arduino UNO tabanlı otomatik hall/direnç ölçüm sistem tasarımı ve uygulaması. *DEÜ FMD*, 24(70), 205–212.

- Han, M., Zhang, X.-S., Meng, B. et al. (2013). r-Shaped hybrid nanogenerator with enhanced piezoelectricity. *ACS Nano*, 7(10), 8554–8560. <https://doi.org/10.1021/nn404023v>
- Hewat, A., David, W. I. F., Van Eijck, L. (2016). Hugo Rietveld (1932–2016). *Journal of Applied Crystallography*, 49(4), 1394–1395. <https://doi.org/10.1107/S1600576716012061>
- Hou, T.-C., Yang, Y., Zhang, H. et al. (2013). Triboelectric nanogenerator built inside shoe insole for harvesting walking energy. *Nano Energy*, 2(5), 856–862. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.03.001>
- Huang, D., Zhao, Y.-J., Chen, D.-H., Shao, Y.-Z. (2008). Magnetism and clustering in Cu doped ZnO. *Applied Physics Letters*, 92(18). <https://doi.org/10.1063/1.2920572>
- Huang, T., Wang, C., Yu, H. et al. (2014). Human walking-driven wearable all-fiber triboelectric nanogenerator containing electrospun polyvinylidene fluoride piezoelectric nanofibers. *Nano Energy*, 14, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.01.038>
- Jeon, Y.P., Wu, C., Yoo, K.-H., Kim, T.W. (2020). Enhancement of the output voltage for triboelectric nanogenerators due to Al doping in the zinc oxide layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 831, 154913. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154913>
- Jeon, Y. P., Park, J. H., Kim, T. W. (2018b). Highly flexible triboelectric nanogenerators fabricated utilizing active layers with a ZnO nanostructure on polyethylene naphthalate substrates. *Applied Surface Science*, 466, 210–214. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.249>
- Jeon, Y.P., Park, J. H., Kim, T. W. (2018a). Highly-enhanced triboelectric nanogenerators based on zinc-oxide nanoripples acting as a triboelectric layer. *Applied Surface Science*, 445, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.125>
- Jeong, D.-W., Kim, J.-J. (2011). p-type conduction in ZnO nanowire Schottky field-effect transistors with Pt metal electrodes. *Journal of the Korean Physical Society*, 59(5), 3133–3137. <https://doi.org/10.3938/jkps.59.3133>
- Jing, Q., Zhu, G., Bai, P. et al. (2014). Case-encapsulated triboelectric nanogenerator for harvesting energy from reciprocating sliding motion. *ACS Nano*, 8(4), 3836–3842. <https://doi.org/10.1021/nn500694y>
- Khushboo., Azad, P. (2017, May). Triboelectric nanogenerator based on vertical contact separation mode for energy harvesting. 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (pp.1499-1502). Greater Noida, India. <https://doi: 10.1109/CCAA.2017.8230037>.

- Kim, D.W., Lee, J.H, Kim, J.K., Jeong, U. (2020). Material aspects of triboelectric energy generation and sensors. *NPG Asia Materials*, 12(6), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0176-0>
- Kim, W.G., Kim, D.W., Tcho I.W. et al. (2021) Triboelectric nanogenerator: structure, mechanism, and applications. *ACS Nano*, 15, 258–287. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09803>
- Ko, Y.H., Nagaraju, G., Lee, S.H., Yu, J.S. (2014). PDMS-based triboelectric and transparent nanogenerators with ZnO nanorod arrays. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6(9), 6631–6637. <https://doi.org/10.1021/am5018072>
- Küpeli A.Ö. (2005). Güneş pilleri ve verimleri. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Lee, M., Chen, C-Y., Wang, S. et al. (2012). A hybrid piezoelectric structure for wearable nanogenerators. *Advanced Materials*, 24(13), 1759–1764. <https://doi.org/10.1002/adma.201200150>
- Li, D., Wu, C., Ruan, L. et al. (2020). Nano energy electron-transfer mechanisms for confirmation of contact-electrification in ZnO / polyimide-based triboelectric nanogenerators, *Nano Energy*, 75,104818. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104818>
- Lin, L., Xie, Y., Wang, S. et al. (2013b). Triboelectric active sensor array for self-powered static and dynamic pressure detection and tactile imaging. *ACS Nano* 7(9), 8266–8274. <https://doi.org/10.1021/nn4037514>
- Lin, Z.-H., Xie, Y., Yang, Y. et al. (2013a). Enhanced triboelectric nanogenerators and triboelectric nanosensor using chemically modified TiO₂ nanomaterials. *ACS Nano*, 7(5), 4554–4560. <https://doi.org/10.1021/nn401256w>
- Mallinen, S.S., Behlow, H., Dong,Y. et al. (2017). Facile and robust triboelectric nanogenerators assembled using off-the-shelf materials. *Nano Energy*, 35, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.03.043>
- Moğulkoç, M. (2013). Al/Al₂O₃/CdS MIS yapısının yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, İstanbul.
- Ning, C., Tian, L., Zhao, X. et al. (2018). Washable textile-structured single-electrode triboelectric nanogenerator for self-powered wearable electronics. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(39), 19143–19150. <https://doi.org/10.1039/c8ta07784c>
- Ohring, M. (2001). *Materials science of thin films*. Academic Press Inc.
- Petrov, I., Orlinov, V., Misiuk, A. (1984). Highly oriented ZnO films obtained by d.c. reactive sputtering of a zinc target. *Thin Film Solids*, 120(1), 55–67. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(84\)90173-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(84)90173-1)

- Pu, X., Song, W., Liu, M. et al. (2016). Wearable Power-Textiles by Integrating Fabric Triboelectric Nanogenerators and Fiber-Shaped Dye-Sensitized Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 6(20). <https://doi.org/10.1002/aenm.201601048>
- Rosa, A.M., da Silva, E.P., Amorim, E. et al. (2012). Growth evolution of ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Journal of Physics: Conference Series*, 370, 012020. doi:10.1088/1742-6596/370/1/012020
- Sarılmaz, A. (2016). Yeni nesil $\text{Cu}_2\text{MSnSe}_4\text{-xSx}$ ($\text{M} = \text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$) nano alaşımlarının koloidal yöntemle sentezi ve boya duyarlı güneş hücresi uygulamaları. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Karaman.
- SEM yapısı. (2022). <http://www.acikbilim.com/2014/02/dosyalar/daha-yakin-olmak-icin-elektron-mikroskoplari-2.html> Erişim: 04.03.2022
- Seung, W., Gupta, M. K., Lee, K. Y. et al. (2015). Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 9(4), 3501–3509. <https://doi.org/10.1021/nn507221f>
- Shi, Q., He, T., Lee, C. (2019). More than energy harvesting—Combining triboelectric nanogenerator and flexible electronics technology for enabling novel micro-/nano-systems. *Nano Energy*, 57, 851–871. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.002>
- Song, Y., Wang, H., Cheng, X. et al. (2019). High-efficiency selfcharging smart bracelet for portable electronics. *Nano Energy*, 55, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.045>
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., ve Akın, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 389–401.
- Studenikin, S. A., Golego, N., Cocivera, M. (1998). Optical and electrical properties of undoped ZnO films grown by spray pyrolysis of zinc nitrate solution. *Journal of Applied Physics*, 83(4). <https://doi.org/10.1063/1.366944>
- Su, T. (2017). Origin of surface potential in undoped zinc oxide films revealed by advanced scanning probe microscopy techniques. *RSC Advances*, 7, 42393–42397. <https://doi.org/10.1039/c7ra06117j>
- Supraja, P., Kumar, R.R., Mishra, S. et al. (2022). A simple and low-cost triboelectric nanogenerator based on two dimensional ZnO nanosheets and its application in portable electronics. *Sensors and Actuators A: Physical*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113368>
- Şenadım, E., Eker, S., Kavak, H., ve Esen, R. (2006). Optical and structural parameters of the ZnO thin film grown by pulsed filtered cathodic vacuum arc deposition. *Solid State Communications*, 139(9), 479–484. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2006.07.001>

- Tantraviwat, D., Buarin, P., Suntalelat, S. et al. (2020). Highly dispersed porous polydimethylsiloxane for boosting power-generating performance of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 67, 104214. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104214>
- Van der Pauw, L.J. (1958). A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. *Philips Research Reports*, 13,1–9. https://doi.org/10.1142/9789814503464_0017
- Wang, S., Lin, L., Wang, Z.-L. (2012). Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics. *Nano Letters*, 12(12), 6339–6346. <https://doi.org/10.1021/nl303573d>
- Wang, S., Lin, L., Xie, Y., Jing, Q., Niu, S., Wang, Z. L. (2013). Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism. *Nano Letters*, 13(5), 2226–2233. <https://doi.org/10.1021/nl400738p>
- Wang, S., Xie, Y., Niu, S., Lin, L., Wang, Z. L. (2014). Freestanding triboelectric layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes. *Advanced Materials*, 26(18), 2818–2824. <https://doi.org/10.1002/adma.201305303>
- Wang, Z. L., Zou, H. et al. (2019). Quantifying the triboelectric series. *Nature Communications*, 10(1). doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x
- Wu, C., Kima, T. W., Sung, S. vd. (2018). Ultrasoft and cuttable paper-based triboelectric nanogenerators for mechanical energy harvesting. *Nano Energy*, 44, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.11.080>
- Xia, K., Zhu, Z., Zhang, H. et al. (2019). Milk-based triboelectric nanogenerator on paper for harvesting energy from human body motion. *Nano Energy*, 56, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.071>
- Yang, W., Chen, J., Zhu, G. et al. (2013a). Harvesting energy from the natural vibration of human walking. *ACS Nano*, 7(12), 11317–11324. <https://doi.org/10.1021/nn405175z>
- Yang, Y., Lin, L., Zhang, Y. et al. (2012). Self-powered magnetic sensor based on a triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 6(11), 10378–10383. <https://doi.org/10.1021/nn304374m>
- Yang, Y., Zhang, H., Lin, Z. et al. (2013c). Human skin based triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy and as self-powered active tactile sensor system. *ACS Nano*, 7(10), 9213–9222. <https://doi.org/10.1021/nn403838y>
- Yang, Y., Zhang, H., Liu, Y. et al. (2013d). Silicon-based hybrid energy cell for self-powered electrodegradation and personal electronics. *ACS Nano*, 7(3), 2808–2813. <https://doi.org/10.1021/nn400361p>

- Yang, Y., Zhang, H., Chen, J. et al. (2013b). Single-electrode-based sliding triboelectric nanogenerator for self-powered displacement vector sensor system. *ACS Nano*, 7(8), 7342–7351. <https://doi.org/10.1021/nn403021m>
- Yang, Y., Zhu, G., Zhang, H. et al. (2013e). Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system. *ACS Nano*, 7(10), 9461–9468. <https://doi.org/10.1021/nn4043157>
- Yarıiletkenler. (2022). <http://eng.harran.edu.tr/~nbesli/SEG/02.Yariiletkenler.pdf> Erişim: 24.01.2022.
- Yılmaz, N. D. (2021). Triboelektrik nanojeneratörler ile enerji hasadı: T teorik köken, çalışma prensibi ve çalışma modları. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 232–249. 10.36306/konjes.745063
- Yoshino, Y., Inoue, K., Takeuchi, M. et al. (2000). Effect of substrate surface morphology and interface microstructure in ZnO thin films formed on various substrates. *Vacuum*, 59(2-3), 403–410. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(00\)00294-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(00)00294-3)
- Yue, X., Xi, Y., Hu, C. et al. (2015). Enhanced output-power of nanogenerator by modifying PDMS film with lateral ZnO nanotubes and Ag nanowires. *RSC Advances*, 5, 32566–32571. <https://doi.org/10.1039/c5ra02098k>
- Yüzüak, G. D., Karagöz, C., Yüzüak, E. (2022). Exploring the sputtering conditions in ZnO thin film for triboelectric nanogenerator electrode. *Int J Energy Res*. 46(14), 20494–20500. <https://doi.org/10.1002/er.7777>
- Yüzüak, G. D. (2016). Hf-Co tabanlı manyetik ince filmlerin b ve n katkılama ile değişen yapısal, manyetik özelliklerinin incelenmesi. [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Zhang, H., ve Quan, L.W. (2019). Theoretical prediction and optimization approach to triboelectric nanogenerator. In Steven H. Voldman (ed.), *Electrostatic discharge* (pp. 1–21). Intechopen.
- Zhang, H., Yao, L., Quan, L., Zheng, X. (2020). Theories for triboelectric nanogenerators: A comprehensive review. *Nanotechnology Reviews*, 9(1). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0049>.
- Zhang, R., Olin, H. (2020). Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review. *Wiley* (pp. 1-13). <https://doi.org/10.1002/eom2.12062>
- Zhang, Z-H., Ye, Z-Z., Ma, D-W., Zhu, L-P. et al. (2005). Preparation and characteristic of p-type ZnO films by Al-N codoping technique. *Materials Letters*, 59(22), 2732–2734. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.04.008>

- Zhu, G., Chen, J., Zhang, T., Jing, Q., Wang, Z. L. (2014). Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator. *Nature Communications*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms4426>
- Zhu, G., Lin, Z-H., Jing, Q. et al. (2013). Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator. *Nano Lett.* 13(2), 847–853. <https://doi.org/10.1021/nl4001053>
- Zhu, G., Pan, G., Guo, W. et al. (2012). Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning. *Nano Lett.* 12(9), 4960–4965. <https://doi.org/10.1021/nl302560k>
- Zi, Y., Niu, S., Wang, J. et al. (2015). Standards and figure-of-merits for quantifying the performance of triboelectric nanogenerators, *Nature Communications*, 6, 8376. <https://www.nature.com/articles/ncomms9376>

