



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**PEROVSKİTE GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN
METAL OKSİT ALTTAŞLARIN ÜRETİMİ VE
TASARIMI**

Furkan Emrullah AŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

**Ekim-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan Emrullah AŞIK tarafından hazırlanan ‘‘Perovskite Güneş Hücreleri için Metal Oksit AlttıŐların retimi ve Tasarımı’’ adlı tez çalışması 01/10/2024 tarihinde aŐaĐıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

İmza

BaŐkan

Doç. Dr. Teoman ÖZTÜRK

.....

Danışman

Doç. Dr. Seçkin AKIN

.....

ye

Doç. Dr. Mücahit YILMAZ

.....

ye

Doç. Dr. Teoman ÖZTÜRK

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıŐtır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez alıŐması Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP programı kapsamında 24YL19001 nolu proje ve TÜBİTAK TEYDEB 1512 TeknogiriŐim Sermayesi Desteği Programı (BiGG) kapsamında 2211279 nolu proje ile desteklenmiŐtir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezde yer alan bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Furkan Emrullah AŞIK

Tarih: 20/09/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PEROVSKİTE GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN METAL OKSİT ALTTAŞLARIN ÜRETİMİ ve TASARIMI

Furkan Emrullah AŞIK

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Seçkin AKIN

2024, 93 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Seçkin AKIN

Doç. Dr. Mücahit YILMAZ

Doç. Dr. Teoman ÖZTÜRK

Tez çalışmasında, düzlemsel mimariye sahip perovskite güneş hücrelerinde (PGH) kullanılmak üzere optimize edilmiş indiyum kalay oksit (ITO) ve flor katkılı kalay oksit (FTO) alttaşların üretimi, karakterizasyonu ve hücre uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, ticari alttaşlara kıyasla daha üstün optoelektronik özellikler sunan metal oksit alttaşları üreterek perovskite hücrelerinin performansını artırmaktır. ITO ve FTO alttaşlar, magnetron saçırma yöntemi kullanılarak RF ve DC güç kaynaklarıyla farklı güç değerlerinde (optimum değerler sırasıyla 320 W ve 137 W) ve sistem için ideal kabul edilen $\sim 5 \times 10^{-3}$ Torr basınç altında üretilmiştir. Düşük basınçta plazma yoğunluğundaki kararsızlık nedeniyle bu strateji tercih edilmiştir. Üretimler, ITO için oda sıcaklığında, FTO için ise 150 °C'de gerçekleştirilmiştir. FTO üretimi sırasında yapıda oluşabilecek oksijen eksiklikleri, ortama az miktarda oksijen verilerek azaltılmaya çalışılmıştır. Üretilen ITO ve FTO kaplı camların elektriksel dirençleri ölçülmüş, ardından farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi uygulanmıştır. Karakterizasyon sonuçları, özellikle ITO alttaşların güneş hücreleri için umut verici özellikler sergilediğini göstermiştir. ITO ve FTO alttaşlar, elektrot/c-TiO₂/perovskite/spiro-OMeTAD/Au mimarisine sahip hücrelerde elektrot olarak kullanılmış ve fotovoltaiik performansları ticari ITO (Sigma-Aldrich, Kintec) ve FTO (Sigma-Aldrich) alttaşlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, proje kapsamında geliştirilen ITO filmlerin ticari ITO'ya göre daha üstün optik ve elektriksel özellikler sergilediğini ve fotovoltaiik verim açısından daha yüksek sonuçlar elde edildiğini ortaya koymuştur. Akım yoğunluğu-voltaj (J-V) karakteristiklerine göre, ticari ITO kullanılan en iyi hücrede %19.9 verim elde edilirken, tez çalışması kapsamında geliştirilen ITO kullanılan hücrede %20.2 verime ulaşılmıştır. Sonuç olarak, bu tez, optimize edilmiş ITO alttaşların güneş hücrelerinde verimliliği artırma potansiyeline sahip olduğunu ve gelecekte optoelektronik aygıt teknolojisinde daha geniş uygulama alanı bulabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Perovskite güneş hücresi, Alttaş, İndiyum kalay oksit, Flor katkılı kalay oksit, Magnetron püskürtme

ABSTRACT

MS THESIS

FABRICATION AND DESIGN OF METAL OXIDE SUBSTRATES FOR PEROVSKITE SOLAR CELLS

Furkan Emrullah AŞIK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN NANO SCIENCE AND ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Seckin AKIN

2024, 93 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Seçkin AKIN
Assoc. Prof. Dr. Mücahit YILMAZ
Assoc. Prof. Dr. Teoman ÖZTÜRK**

In this thesis, the production, characterization, and cell applications of optimized indium tin oxide (ITO) and fluorine-doped tin oxide (FTO) substrates for use in planar perovskite solar cells (PSCs) were carried out. The aim of this study is to produce metal oxide substrates that offer superior optoelectronic properties compared to commercial substrates, thereby improving the performance of perovskite cells. ITO and FTO substrates were produced using the magnetron sputtering method with RF and DC power supplies at different power levels (optimum values of 320 W and 137 W, respectively) under an ideal system pressure of $\sim 5 \times 10^{-3}$ Torr. This strategy was chosen due to plasma instability and fluctuations at low pressures. Production was conducted at room temperature for ITO and at 150 °C for FTO. During FTO production, a small amount of oxygen was introduced to correct potential oxygen deficiencies in the structure. The electrical resistances of the produced ITO and FTO-coated glass were measured, followed by annealing at various temperatures in an atmospheric environment. Characterization results revealed that ITO substrates, in particular, exhibit promising properties for solar cell applications. The ITO and FTO substrates were used as electrodes in cells with the electrode/c-TiO₂/perovskite/spiro-OMeTAD/Au architecture, and their photovoltaic performance was compared to commercial ITO (Sigma-Aldrich, Kintec) and FTO (Sigma-Aldrich) substrates. Results showed that the ITO films developed within this project demonstrated enhanced optical and electrical properties compared to commercial ITO, and higher photovoltaic efficiency was achieved. According to current density-voltage (J-V) characteristics, the champion cell using commercial ITO achieved an efficiency of 19.9%, while the cell using ITO developed in this thesis reached an efficiency of 20.2%. In conclusion, this thesis demonstrates that optimized ITO substrates have significant potential to enhance the efficiency of perovskite cells and may find broader applications in optoelectronic device technology in the future.

Keywords: Perovskite solar cell, Substrate, Indium tin oxide, Fluorine-doped tin oxide, Magnetron sputtering

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Seçkin AKIN'ın danışmanlığında hazırlanmış olup, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur. Tezimin her aşamasında bilgi, tecrübe, öneri ve desteğini esirgemeyen kıymetli danışmanım Doç. Dr. Seçkin AKIN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bilgi ve tecrübelerini paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Mücahit YILMAZ'a ve laboratuvar çalışmaları süresince desteklerini esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Dr. Faranak SADEGH, Dr. Murat EBİÇ, Dr. Bülent ALKAN, Zeynep MAVİLİ, Muhittin ÜNAL ve Ayşegül SEZGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman yanımda olan ve destekleriyle bana güç veren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Furkan Emrullah AŞIK
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. İndiyum Kalay Oksit (ITO)	3
1.2. Flor Katkılı Kalay Oksit (FTO)	5
1.3. Alüminyum Katkılı Çinko Oksit (AZO).....	6
1.4. Galyum Katkılı Çinko Oksit (GZO)	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	30
4.1. ITO Elektrot Üretim ve Karakterizasyon Çalışmaları	30
4.2. FTO Elektrot Üretim ve Karakterizasyon Çalışmaları	49
4.3. Hücre Üretim ve Karakterizasyon Çalışmaları	66
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
5.1 Sonuçlar	70
5.2 Öneriler	71
6. KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°	: Derece
Å	: Angstrom
e	: Elektron
I	: Işık Şiddeti
m	: Mobilite
µm	: SI Birimde Mikrometre (10 ⁻⁶ m)
n _c	: Taşıyıcı Yoğunluğu
s	: Saniye
T	: Geçen Işığın Geçirgenlik Yüzdesi
α	: Soğurma Katsayısı
κ	: Isıl İletkenlik
λ	: Dalga Boyu
Ω	: Direnç Birimi (ohm)
eV	: Band Boşluğu (Elektron Volt)
Khz	: Kiloherertz
sccm	: Akış Ölçüm Birimi (Standart Santimetre Küp/Dakika)
Torr	: Basınç Birimi

Kısaltmalar

Ag	: Gümüş
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
Al	: Alüminyum
Au	: Altın
AZO	: Alüminyum Katkılı Çinko Oksit
Cd	: Kadmiyum
CdIn ₂ O ₄	: Kadmiyum İndat
Cd ₂ SnO ₄	: Kadmiyum Stanat
CF ₄	: Karbon Tetraflorür
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	: Doğru Akım
DFT	: Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi
DI	: Deiyonize
DMF	: Dimetilformamid
DMSO	: Dimetilsülfoksit
DSSC	: Boya ile Duyarlılaştırılmış Güneş Hücreleri
EQE	: Dış Kuantum Verimliliği
ETL	: Elektron Transfer Tabakası
EQE	: Dış Kuantum Verimliliği
FESEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu

F	: Flor
FF	: Dolum Faktörü
FTO	: Flor Katkılı Kalay Oksit
Ga	: Galyum
GZO	: Galyum Katkılı Çinko Oksit
HTL	: Boşluk Transfer Tabakası
In	: İndiyum
In ₂ O ₃	: İndiyum Oksit
ITO	: İndiyum Kalay Oksit
IWO	: Tungsten Katkılı Kalay Oksit
IZTO	: İndiyum Çinko Kalay Oksit
IPCE	: Yük-Foton-Akım Verimliliği
I-V	: Akım Yoğunluğu-Voltaj
J _{sc}	: Kısa Devre Akım Yoğunluğu
Li-TFSI	: Lityum Bis(triflorometanesulfonil)imid
LED	: Işık Yayan Diyot
MgIn ₂ O ₄	: Magnezyum İndat
NiO	: Nikel Oksit
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot
PCE	: Güç Dönüşüm Verimliliği
PEN	: Polietilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PGH	: Perovskite Güneş Hücresi
PL	: Fotolüminesans
RF	: Radyo Frekansı
Sb	: Antimon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHJ	: Silikon Heteroeklem
SiO	: Saydam İletken Oksit
ST-PGH	: Saydam Perovskite Güneş Hücreleri
spiro-OMeTAD:2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-methoxyphenyl)amino]-9,9'-spirobifluorene	
Sn	: Kalay
SnO ₂	: Kalay Oksit
Te	: Tellür
TiO ₂	: Titanyumdioksit
Tl	: Talyum
UV	: Ultraviyole
UV-VIS	: Ultraviyole-Görünür Bölge
V _{oc}	: Açık Devre Gerilim
XPS	: X-Işınları Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
ZnO	: Çinko Oksit
Zn ₂ SnO ₄	: Çinko Stanat
Zn	: Çinko

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojiye en büyük katkıyı sağlayan yarı-iletken teknolojisi, saydam iletken oksitlerin (SİO) geliştirilmesine olanak tanımıştır. Yüksek optik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip olan SİO ince filmler, son yıllarda özellikle optoelektronik cihazlar, ince filmler, düz panel ekranlar, gaz ve nem sensörleri gibi alanlarda yoğun şekilde araştırılmaktadır. Ayrıca, perovskite güneş hücreleri (PGH) gibi yeni nesil enerji teknolojilerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler yarı-iletken özellikler sergilediğinden SİO'lar yarı-iletkenler olarak da kabul edilmektedir (Hosono, 2002). Farklı yöntemlerle üretilmiş pek çok SİO yarı-iletken film bulunmaktadır. En sık kullanılan SİO yarı-iletkenler Çizelge 1.1'de özetlenmiştir. Bu SİO malzemeleri, gelişmiş optoelektronik cihazların performansını artırma amacıyla çeşitli yarı-iletken uygulamalarında kullanılır.

Çizelge 1.1. İnce film saydam elektrotlar için SİO yarı-iletkenler (Minami, 2005).

Malzeme	Katkı ya da bileşik
SnO ₂	Sb, F, As, Nb, Ta
In ₂ O ₃	Sn, Ge, Mo, F, Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, W, Te
ZnO	Al, Ga, B, In, Y, Sc, F, V, Si, Ge, Ti, Zr, Hf
CdO	In, Sn
ZnO–SnO ₂	Zn ₂ SnO ₄ , ZnSnO ₃
ZnO–In ₂ O ₃	Zn ₂ In ₂ O ₅ , Zn ₃ In ₂ O ₆
In ₂ O ₃ –SnO ₂	In ₄ Sn ₃ O ₁₂
CdO–SnO ₂	Cd ₂ SnO ₄ , CdSnO ₃
CdO–In ₂ O ₃	CdIn ₂ O ₄
MgIn ₂ O ₄	-
GaInO ₃ , (Ga,In) ₂ O ₃	Sn, Ge
CdSb ₂ O ₆	Y
ZnO–In ₂ O ₃ –SnO ₂	Zn ₂ In ₂ O ₅ –In ₄ Sn ₃ O ₁₂
CdO–In ₂ O ₃ –SnO ₂	CdIn ₂ O ₄ –Cd ₂ SnO ₄
ZnO–CdO–In ₂ O ₃ –SnO ₂	-

Yarı-iletken teknolojisi, günümüz teknolojik ilerlemelerinde en büyük katkıyı sağlayan alanlardan biri olarak kabul edilmektedir. Yarı-iletkenlerden üretilen SİO malzemeler, yüksek optik geçirgenlikleri ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle son yıllarda yoğun ilgi gören malzemeler arasındadır. Bu malzemeler, özellikle ince filmler, düz panel ekranlar, gaz ve nem sensörleri ile PGH gibi optoelektronik cihazlarda geniş kullanım alanına sahiptir. SİO'lar, genellikle polikristal veya amorf yapıdadır ve 10⁻³

Ω .cm veya daha düşük özdirence, ayrıca görünür bölgede %80'in üzerinde bir geçirgenliğe sahiptirler (Minami, 2005).

SİO yarı-iletkenlerin n-tipi veya p-tipi olarak dejenerasyona uğramış yapıları, yüksek taşıyıcı yoğunlukları ($\sim 10^{20}$ cm⁻³) ve geniş bant aralıkları (~ 3.2 eV ve üzeri) nedeniyle görünür bölgede saydam özellik gösterebilirler. SİO ince filmlerin geliştirilmesi sırasında çoğunlukla n-tipi yarı-iletkenler üzerinde çalışılmaktadır; çünkü bu tür malzemeler, elektron hareketliliğinin boşluk hareketliliğinden daha yüksek olması nedeniyle tercih edilir (Edwards ve ark., 2004). Bununla birlikte, p-tipi SİO'lar da araştırılmış olup, ilk kez 1993'te p-tipi nikel oksit (NiO) SİO ince filmler rapor edilmiştir (Sato ve ark., 1993). Ancak p-tipi SİO'lar, performans ve kullanım alanı açısından halen n-tipi SİO'ların gerisinde kalmaktadır (Kawazoe ve ark., 1997; Suzuki ve ark., 2003). SİO ince filmler, saf kalay oksit (SnO₂), indiyum oksit (In₂O₃), çinko oksit (ZnO) ve kadmiyum oksit (CdO) gibi ikili bileşiklerden üretilmiştir. Bu malzemelere katılan elementler arasında antimon (Sb) ve flor (F) ile SnO₂ flor katkılı kalay oksit (FTO), Sn ile In₂O₃ indiyum kalay oksit (ITO), alüminyum (Al) ve galyum (Ga) ile ZnO Alüminyum katkılı çinko oksit (AZO) ve galyum katkılı çinko oksit (GZO) gibi örnekler sayılabilir. Buna ek olarak, yüksek optik saydamlık ve iletkenliğe sahip ince filmler, katkısız olarak da üretilebilmektedir. Ancak katkısız oksit filmler yüksek sıcaklıkta kararlılık sorunları yaşadığından, pratikte kullanımları sınırlıdır (Minami ve ark., 1984; Nanto ve Takata, 1984).

SİO ince filmler arasında üçlü bileşikler, kimyasal kompozisyon kontrolü daha zor olmasına rağmen, geniş bant aralığı ve iletkenlik gibi özelliklerin optimize edilebilmesi açısından dikkat çekmektedir. Örneğin, kadmiyum stannat (Cd₂SnO₄), kadmiyum stannat (CdSnO₃), kadmiyum indat (CdIn₂O₄), çinko stanat (Zn₂SnO₄) ve magnezyum indat (MgIn₂O₄) gibi üçlü bileşikler geliştirilmiş olmasına rağmen, ticari olarak yaygın kullanımda değildirler (Dawar ve Joshi, 1984). Özel uygulamalara yönelik SİO filmlerinin tasarımı, çok bileşenli oksitler sayesinde mümkün hale gelmiştir ve günümüzde bu yönde aktif araştırmalar devam etmektedir (Minami, 2000). Son olarak, grafen gibi yeni nesil saydam iletken malzemeler, üstün elektriksel iletkenlikleri ve esneklik özellikleri nedeniyle yoğun olarak araştırılmaktadır (Geim ve Novoselov, 2007). Çizelge 1.1'de yer alan SİO'lar içinde çinko (Zn), kadmiyum (Cd), indiyum (In) ve kalay (Sn) elementlerinden en az birini içeren SİO ince filmlerden Cd içeren bileşikler Cd'nin sahip olduğu toksite nedeniyle pratikte kullanımları yoktur (Coutts ve ark., 2000; Freeman ve ark., 2000). SİO ince filmler için safsızlık katkılı ZnO, In₂O₃ ve SnO₂ gibi

SİO yarı-iletkenleri ve bu ikili bileşiklerin kombinasyonlarından oluşan çok bileşenli oksitler pratik kullanım için günümüzden en çok tercih edilen yapılardır. Günümüzde uygulamada yer bulmuş SİO ince filmlerin üretim yöntemleri ve temel özellikleri Çizelge 1.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 1.2. Farklı tekniklerle büyütülmüş $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO), $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO), $\text{ZnO}:\text{Al}$ (AZO), ve $\text{ZnO}:\text{Ga}$ (GZO) yapıların temel özellikleri (Vigil-Galán ve ark., 2015).

SİO	Biriktirme yöntemleri	Bant boşluğu (eV)	Taşıyıcı konsatrasyonu (10^{20} cm^{-3})	Mobilite ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	Özdirenç ($10^{-4} \Omega.\text{cm}$)	Geçirgenlik (%)
ITO	Atımlı lazer biriktirme	-	13,8	53,8	0,85	>80
ITO	Sprey piroliz	-	18	40	0,95	81
ITO	Saçtırma	3,78-3,80	14,6-18,9	25,7-32,7	1,28-1,29	>80
FTO	Sprey piroliz	3,15-4,18	1,02-24,9	6,59-24	3,8-7,51	>75
FTO	Kimyasal buhar biriktirme	-	3,05	19	10,9	~80
AZO	Moleküler demet epitaksi	-	2,1	57	-	-
AZO	Kimyasal buhar biriktirme	3,59	8,7	-	-	-
AZO	Sol-jel	-	2,5	31	1,2	>90
AZO	Saçtırma	3,18-3,36	5,5-15	22-67	1,4-980	>80
AZO	Atımlı lazer biriktirme	3,51-3,86	13,1-20,2	16,2-47,6	0,85-1,91	>75
GZO	Moleküler demet epitaksi	-	3,5-15	18-42	1,9	>80
GZO	Kimyasal buhar biriktirme	-	-	-	1,2	>85
GZO	Saçtırma	3,37-3,43	1-6	5-35	5,3	~90
GZO	Atımlı lazer biriktirme	3,51	64-146	4,9-30,9	0,8-2,6	>90

Literatürde yoğun olarak rapor edilen ve ticari uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulan bazı metal oksit filmlerine dair bilgiler aşağıda özetlenmiştir. Bu çalışmalar, özellikle şeffaf ve iletken film teknolojilerinin gelişimini ve bu malzemelerin çeşitli uygulamalardaki potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Metal oksit filmleri, güneş hücreleri, akıllı cihaz ekranları ve diğer optoelektronik cihazlarda önemli performans iyileştirmeleri sağlamak amacıyla çeşitli üretim teknikleriyle optimize edilmiştir. FTO ve ITO tabanlı filmler üzerindeki araştırmalar, bu malzemelerin geçirgenlik, iletkenlik ve korozyon direnci gibi özelliklerinin nasıl geliştirilebileceğini ve bu geliştirmelerin pratik uygulamalara nasıl yansıtılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmalar, metal oksit filmlerinin performansını artırma ve endüstriyel uygulamalarda daha etkin bir şekilde kullanılmalarını sağlama yönündeki önemli adımları ortaya koymaktadır.

1.1 İndiyum Kalay Oksit (ITO)

ITO, yapısından ve bileşiminden dolayı malzeme biliminde ve teknolojisinde SİO sınıfında önemli bir yer tutar. ITO, hem yüksek elektriksel iletkenliği hem de görünür

bölgede yüksek optik geçirgenliği ile birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. İnce film formundaki ITO, görünür spektrumda yüksek optik geçirgenlik ve geniş bant aralığına sahip bir n-tipi yarı-iletken oksit olarak tanımlanır. Bu filmler, kaplama yapılan altlığa mükemmel bir şekilde yapışarak, elektronik ve mekanik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kamei ve ark., 2001). ITO, düşük elektrik direnci ve metalik iletkenliğe yakın iletkenlik özellikleri ile bilinir. İlk olarak ince film formunda 1907 yılında Badeker tarafından tanımlanan ITO, farklı biriktirme teknikleri ile üretilen filmlerde ortalama öz direnci yaklaşık $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ olarak ölçülmüştür; bu değer, FTO'nun öz direnciyle karşılaştırıldığında daha düşüktür. FTO için standart üretim tekniği olan spreylendirme ile üretilen filmlerin öz direnci yaklaşık $3.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 'dir. Ayrıca, AZO ve GZO filmlerinin öz direnç değerleri, ITO ile karşılaştırılabilir düzeylerde olup, optik geçirgenlikleri genellikle ITO'nunkinden biraz daha yüksektir. Bu özellikleri nedeniyle AZO ve GZO, gelecekte ITO'nun yerini alabilecek potansiyel alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle AZO, kızılötesi bölgede yüksek geçirgenlik ve yüksek hareketlilik özellikleri ile karakterize edilir. Ancak, AZO'nun yüksek sıcaklık uygulamalarında gösterdiği kararsızlık, bu malzemenin kullanımını sınırlayan bir faktördür (Vigil-Galán ve ark., 2015). Bu bağlamda, ITO'nun üstün özellikleri ve yaygın kullanımı, malzeme bilimi ve teknolojisindeki önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 1.2'de gösterilen SİO'lar içinden ITO ince filmler, ışık yayan diyotlar (LED) (Tak ve ark., 2002), güneş hücrelerinin yansımaya önleyici elektrotları (Chu ve ark., 2008), yansımaya önleyici kaplamalar ve gaz sensörleri (Hartnagel, 1995) gibi optoelektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek kaliteli bir ITO filminin en önemli parametreleri elektriksel öz direnç ve optik geçirgenliktir. ITO filmlerinin düşük elektrik direnci, hem indiyum yerine kalayın kısmi ikamesine hem de film biriktirme sırasında oksijen boşluklarının yaratılmasına bağlanmıştır. Ancak çok fazla oksijen boşluğu iletimde azalmaya neden olabilir (Wu ve ark., 1994). Ayrıca, görünür aralıkta mükemmel şeffaflık (%80) sergileyen ITO, optoelektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. ITO filmleri, spreylendirme (Rozati ve Ganj, 2004), sol-jel yöntemi (Craciun ve ark., 2004; Mostafa Hosseinpour-Mashkani ve ark., 2016), darbeli lazer biriktirme (Viespe ve ark., 2007), magnetron saçtırma (Hussain, ve ark., 2014; Nisha ve ark., 2010), elektron ışını buharlaştırma (Varnamkhasti ve Soleimani, 2015) ve kimyasal buhar biriktirme (Minami, 2005) gibi çeşitli tekniklerle biriktirilebilmektedir. Bu teknikler arasında magnetron saçtırma yöntemi, tekrar üretilebilirliği, yüksek biriktirme hızları, düşük biriktirme basınçları, yüksek kaliteli filmler, daha fazla yapışma, geniş alanlarda daha iyi

üniformite ve biriktirme sırasında düşük altlık sıcaklığı gibi belirli avantajlar ile sağlamaktadır. Bu yöntemde, ITO ince filmlerinin elektriksel ve optik özellikleri alttaş sıcaklığı (Marikkannu ve ark., 2014; Wei ve Shuying, 2011; Xu ve ark., 2014), biriktirme basıncı (Gheidari ve ark., 2007; Wei ve Shuying, 2011), reaktif gaz kombinasyonları (Kim ve ark., 2010; Okada ve ark., 2011), saçtırma gücü (Hussain ve ark., 2014; Kashyout ve ark., 2011; Wei ve Shuying, 2011), ısıl tavlama (Gulen ve ark., 2013; Song ve ark., 2011; G. Zhu ve Yang, 2013) ve hedef - alttaş mesafesi (Kumar ve Mansingh, 1989) gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir.

1.2. Flor Katkılı Kalay Oksit (FTO)

FTO, temel olarak SnO₂ içeren ve F ile doplanmış bir n-tipi yarı-iletken malzemedir. SnO₂, yaklaşık 3,6 eV bant boşluğuna sahip bir yarı-iletken olup, görünür ışık bölgesinde yüksek şeffaflık sunar ve kızılötesi bölgede yansıtıcı, ultraviyole (UV) bölgede ise düşük hassasiyet gösterir (Kong ve ark., 2009). SnO₂'nin iletkenliği, rutil yapısına benzeyen ve tetragonal örgüye sahip olan oksijen boşluklarına dayanmaktadır (Moholkar ve ark., 2007). SnO₂'nin elektriksel özelliklerini geliştirmek amacıyla, periyodik tablodaki grup III, V, VI ve VII elementleri ile katkılama yapılabilir. Bu elementler arasında talyum (Tl), Sb, tellür (Te) ve F yer alır. Bunlar arasından flor ile doplanmış SnO₂, yani FTO, hem kimyasal hem de termal kararlılığı sayesinde en yaygın kullanılan malzeme olarak öne çıkmaktadır (Ghafouri ve ark., 2012; Yadav ve ark., 2009). Florun, oksijen ile benzer anyonik boyutları ($R_{O^{2-}} = 1.32 \text{ \AA}$ ve $R_{F^-} = 1.33 \text{ \AA}$) nedeniyle ideal bir ikame maddesi olarak işlev görmesi, FTO'nun performansını destekleyen önemli bir faktördür (Russo ve Cao, 2008).

FTO'nun ince film formu, yüksek kristallik ve geniş yüzey alanı ile performansını artırabilir (Nazeeruddin ve ark., 2011). Bu ince filmler, güneş hücrelerindeki pencere katmanları, gaz sensörleri ve elektrodepozisyon için alt tabakalar gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Chae ve ark., 2010; Hossein-Babaei ve Amini, 2012; Khelladi ve ark., 2010). Güneş hücreleri gibi cihazlarda, ışık hücreye çarptığında enerjisinin bir kısmı yarı-iletken malzeme tarafından soğrulur. Bu süreçte serbest hale gelen elektronların ve arkalarında bıraktıkları boşlukların (holler) elektriksel iletim için uygun bir iletken kontağa aktarılması gerekmektedir. Bu bağlamda, FTO, boya ile duyarlılaştırılmış güneş hücreleri (DSSC) ve PGH gibi çeşitli güneş hücresi tiplerinde tercih edilen bir saydam iletken elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır.

FTO'nun yaygın kullanımının başlıca nedenlerinden biri, malzemenin kimyasal ve termal kararlılığıdır (Nazeeruddin ve ark., 2011). FTO ince filmleri, kimyasal buhar biriktirme (Fang ve Chang, 2003), darbeli lazer biriktirme (Chen ve ark., 2005), radyo frekansı (RF) magnetron saçırma (Jäger ve ark., 2014; Zhu ve ark., 2017, 2022) ve sol-jel ile sprey piroliz (Moholkar ve ark., 2007) gibi çeşitli üretim yöntemleriyle büyütülebilir. Bu yöntemler, FTO filmlerinin istenilen özellikleri sağlamak için çeşitli üretim parametrelerinin optimize edilmesine olanak tanır. Bu çeşitli yöntemlerin ve FTO'nun üstün özelliklerinin birleşimi, malzemenin geniş uygulama yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

1.3. Alüminyum Katkılı Çinko Oksit (AZO)

AZO, optoelektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir SiO malzemesidir. AZO, temel bileşen olarak ZnO ve düşük miktarda Al katkısı ile elde edilir. Alüminyum katkısı, çinko oksidin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde artırarak, AZO'nun performansını geliştirmektedir. Bu katkının etkisiyle AZO, görünür ışık spektrumunda yüksek optik geçirgenlik ve düşük elektriksel direnç özellikleri sunar. Bu özellikler, AZO'yu güneş panelleri, ekran teknolojileri ve LED'ler gibi çeşitli uygulamalarda ideal bir malzeme haline getirmektedir. AZO'nun çevre dostu olması, onu ekolojik olarak sürdürülebilir alternatifler arasında öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda, AZO'nun uygulama alanları güneş panelleri, düz panel ekranlar ve akıllı pencere teknolojilerini içermektedir. AZO'nun performansını artırmaya yönelik çeşitli araştırmalar, bu malzemenin daha verimli ve etkili kullanımını sağlamak için devam etmektedir. Bu araştırmalar arasında katkı maddelerinin optimizasyonu, üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gibi konular öne çıkmaktadır (Ginley ve ark., 2010; Capper ve Willoughby, 2011; Ellmer, 2007; Minami, 2000).

Özellikle, AZO'nun yüksek optik geçirgenliği ve düşük elektriksel direnci, onu silikon/perovskite tandem güneş hücreleri gibi yenilikçi teknolojilerde ve daha verimli enerji sistemlerinde kullanılabilir hale getirmektedir. Gelecekte, AZO'nun bu tür yeni teknolojilerde daha geniş bir kullanım alanı bulması beklenmektedir. Bu malzemenin düşük maliyeti ve çevre dostu özellikleri, AZO'yu modern optoelektronik uygulamalarında önemli bir malzeme olarak konumlandırmaktadır. Bu nedenle, AZO'nun

araştırma ve geliştirme faaliyetleri hem teknolojik ilerlemeleri desteklemek hem de sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmak amacıyla kritik bir öneme sahiptir.

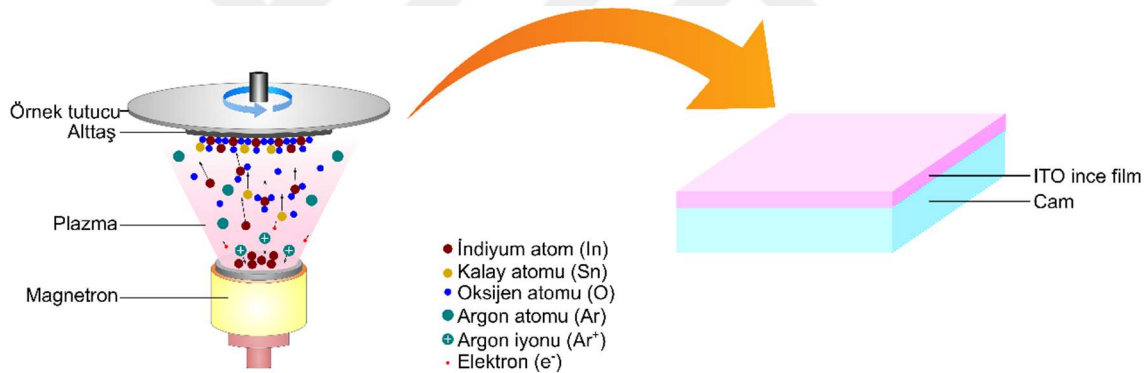
1.4. Galyum Katkılı Çinko Oksit (GZO)

GZO, ZnO matrisine Ga atomlarının doplanmasıyla elde edilen bir n-tipi yarıiletken malzemedir. GZO'nun bu yapısal modifikasyonu, malzemenin elektriksel ve optik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. GZO, güneş hücreleri, ince film transistörleri, dokunmatik ekranlar ve enerji tasarruflu pencere kaplamaları gibi geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmektedir. Bu malzeme, yüksek optik geçirgenlik (> %83) ve düşük elektriksel direnç ($1,51 \times 10^{-4} \Omega.cm$) gibi üstün özellikler sunar, bu da onu SiO uygulamaları için cazip bir seçenek yapmaktadır. GZO ince filmleri, genellikle RF magnetron saçırma yöntemi ile üretilir. Bu yöntem, yüksek saflıkta ve kontrollü yapıdaki ince filmler elde etmede etkili bir tekniktir. RF magnetron saçırma sürecinde, hedef malzeme (GZO) bir argon ortamında iyonize edilir ve bu iyonlar, substrata (alt tabaka) doğru yönlendirilir. Üretim parametreleri, filmin nihai özelliklerini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Bu parametreler arasında RF gücü, argon basıncı, hedef ve alt tabaka arasındaki mesafe ve kaplama süresi bulunur. Bu parametrelerin titiz bir şekilde kontrol edilmesi, istenilen film özelliklerinin elde edilmesi açısından gereklidir.

GZO filmlerinin karakterizasyonunda, çeşitli analitik teknikler kullanılmaktadır. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), yüzey morfolojisini ve topografyasını nanometre ölçeğinde incelemek için kullanılır. X-ışını difraksiyonu (XRD), filmin kristal yapısını ve faz analizini sağlarken, X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yüzey kimyasal bileşenlerini ve kimyasal durumları belirlemede kullanılır. Ultraviyole-görünür spektrofotometri (UV-VIS) ise filmin optik özelliklerini, özellikle optik geçirgenlik ve bant aralığı gibi parametreleri değerlendirmek için uygulanır. GZO'nun bu kapsamlı karakterizasyonu, malzemenin performansını ve uygulama potansiyelini belirlemede kritik öneme sahiptir. Özellikle, düşük elektriksel direnç ve yüksek optik geçirgenlik özellikleri, GZO'yu çeşitli optoelektronik uygulamalarda etkili bir malzeme haline getirmektedir. Bununla birlikte, GZO'nun yüksek sıcaklık ve kimyasal çevre koşullarına karşı stabilitesinin daha fazla araştırılması, malzemenin uzun vadeli performansını artırmak için önemlidir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında filmlerin üretimi magnetron saçırma tekniği kullanılarak yapılmıştır. Saçırma prosesinde pozitif inert gaz iyonları (genellikle argon), hedef malzemeyi bombardıman ederler ve atom gruplarını yerinden oynatırlar. Buhar fazına geçen atom grupları, taban malzeme üzerine biriktirilir. Saçırma yönteminin en önemli avantajı; farklı buhar basınçlarına, dolayısıyla farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilebilmesidir (Holmberg ve Matthews, 1997; Bunshah, 1980). Bu yöntemin bir başka avantajı, film yapısına makropartiküllerin girme olasılığının düşük olmasıdır. Magnetron saçırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.1'de sunulmuştur. Bu bölümde hem magnetron saçırma hem de farklı yöntemler kullanılarak üretilen çeşitli metal oksit elektrotlara ait literatürdeki çalışmalar kronolojik sırayla sunulmuştur.



Şekil 2.1. Magnetron saçırma sisteminin şematik görüntüsü

2002 yılında Teixeira ve arkadaşları ITO ince filmleri, farklı voltaj ve alt tabaka sıcaklıklarında doğru akım (DC) magnetron reaktif saçırma tekniği kullanarak cam alttaş tabakalar üzerine kaplamıştır. Farklı koşullar altında elde edilen film özelliklerinde, mikro yapı ve diğer fiziksel özelliklerde bazı iyileştirmeler elde edilmiştir. ITO filmlerinin geçirgenliği, emilimi, spektral ve dağınık yansıması bazı UV-Vis-NIR aralıklarında ölçülmüştür. Filmin kırılma indisi (n), yasak enerji bant aralığı (E_g) ve yüzey pürüzlülüğü ölçülen spektrum verilerinden türetilmiştir. Filmin mikro iletken özelliklerinin taşıyıcı yoğunluğu (n_c) ve taşıyıcı hareketliliği (m) tartışılmıştır. Filmlerin, elektrokromik uygulamalar için uygun optik geçirgenlik ve iletkenlik sergilediği tespit edilmiştir (Teixeira ve ark., 2002).

2009 yılında Park ve arkadaşları oda sıcaklığında, saf Ar ortamında, RF magnetron saçtırma ile hazırlanan indiyum çinko kalay oksit (IZTO) filmlerinin elektriksel, optik, yapısal ve tavlama özelliklerini araştırmıştır. Oda sıcaklığında dengesiz RF saçtırma ile büyütülen IZTO filmlerinin elektriksel ve optik özelliklerinin RF gücü ve çalışma basıncından etkilendiği tespit edilmiştir. Optimize edilmiş büyüme koşullarında, düşük alttaş sıcaklığı nedeniyle tamamen amorf bir yapı olmasına rağmen, son tavlama işlemi yapılmaksızın $3,77 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 'lik düşük özdirenç ve $\sim 87\%$ 'lik yüksek optik geçirgenliğe sahip IZTO filmi elde edilmiştir. Ek olarak, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopu (FESEM) analiz sonuçları, tüm IZTO filmlerinin RF gücü ve çalışma basıncından bağımsız olarak çok pürüzsüz yüzeylere sahip amorf yapılar olduğunu göstermiştir. Ancak 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan hızlı termal tavlama işleminin, film yapısının amorf yapıdan kristal yapıya geçişi nedeniyle özdirençte ve levha direncinde ani bir artışa neden olduğu gözlemlenmiş ve bu durum XRD analizi ile de doğrulanmıştır (Park ve ark., 2009).

2011 yılında Kumar ve arkadaşları şeffaf ve iletken ITO ince filmleri, oda sıcaklığında reaktif DC magnetron saçtırma tekniği ile cam alt tabakalar üzerine kaplamıştır. Kalınlığı 165–1175 nm arasında olan ITO ince filmlerin fiziksel (yapısal, optik, elektriksel) ve foto katalitik özellikleri üzerindeki etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Artan kalınlıkla filmlerin (440) yönünde tercihli bir yönelimle amorf tan polikristaline dönüştüğü, ortalama tane boyutunun ve pürüzlülüğünün sırasıyla 35 nm'den 100 nm'ye ve 2,3 nm'den 8,6 nm'ye çıktığı, optik bant aralığının 3,65 eV'den 3,45 eV'ye düştüğü ve bağıl yoğunluğun (kırılma indisi verilerinden hesaplanmıştır) azaldığı gözlemlenmiştir. Dört prob ve Hall etkisi ölçümü, 545 nm kalınlığındaki film için düşük özdirenç ($4,5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$), hareketlilik ($26 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) ve yüksek taşıyıcı konsantrasyonu ($5,3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) değerleri göstermektedir. Mevcut çalışma, ITO'nun organik bileşiklerin bozunması için umut verici bir fotokatalitik malzeme olduğunu göstermektedir (Kumar ve ark., 2011).

2011 yılında Ahn ve arkadaşları darbeli DC saçtırma sistemi kullanılarak film ve darbeli DC gücünün görev oranının ITO/polietilen tereftalat (PET) filminin özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve ters zaman ve frekans değiştirilerek analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlardan, darbeli DC saçtırmalı ITO/PET filmlerinin özelliklerinin geleneksel DC saçtırmalı filmlerin özelliklerinden üstün olduğu görülmüştür. Ters voltajın ITO hedef yüzeyinde biriken pozitif iyonları ve safsızlıkları giderdiği ve darbeli voltaj sonucu ark deşarjının oluşmadığı düşünülmektedir. Ters zamanın, 0,5 ila 2,0 s

arasında değiştiğinde ve frekans 200 kHz'de tutulduğunda ITO/PET filmlerinin özellikleri üzerinde çok az etkisi olmuştur. Ayrıca, görev oranı yaklaşık %70-80 olduğunda biriken iyonlar ve safsızlıklar iyi bir şekilde giderilebilmiştir. Bununla birlikte, ITO/PET filmlerinin elektriksel özellikleri, darbeli DC gücünün frekansının 300'den 100 kHz'e değişmesiyle önemli bir fark göstermiştir. Optimal ITO/PET filmi, frekans 200 kHz, ters zaman 1 s ve görev oranı yaklaşık %80 olduğunda elde edilmiştir (Ahn ve ark., 2011).

2012 yılında Chaoumead ve arkadaşları fotovoltaiik uygulamalar için kontak olarak yaygın olarak kullanılan yüksek kaliteli şeffaf iletken bir oksit olan titanyum katkılı indiyum oksit (ITiO) filmleri RF magnetron saçtırma yöntemi ile Corning cam alttaş üzerine kaplamıştır. RF saçtırma gücünün ve Ar gaz basıncının filmlerin yapısal ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri, %2,5 ağırlık oranında TiO₂ katkılı In₂O₃ hedefi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Gaz basıncı ve RF magnetron saçtırma gücünün deneysel koşulları altında biriktirme hızı yaklaşık 20 ila 60 nm/dak aralığında ayarlanmıştır. Bu durumda, 300 W RF gücünde ve 15 mTorr Ar gaz basıncında hazırlanan ITiO filmi için $1,2 \times 10^{-4}$ Ω.cm'lik en düşük özdirenç ve %75'lik ortalama optik geçirgenlik elde edilmiştir. Bu özdirenç, çeşitli elektro-optik hücrelerde şeffaf iletken tabaka olarak yeterince düşük ve ITO veya ZnO:Al iletken tabakasıyla karşılaştırılabilecek değerde olduğu tespit edilmiştir (Chaoumead ve ark., 2013).

2014 yılında Chen ve arkadaşları ITO ince filmleri, oda sıcaklığında DC magnetron saçtırma yöntemi ile hazırlamıştır. Optik emilimin, 300–425 nm dalga boyu aralığında saçtırma oksijen akış hızlarıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Örneklerin XPS karakterizasyonu, ince filmlerdeki oksijen boşluklarının saçtırma oksijen akış hızlarıyla arttığını ve bunun da absorpsiyon kenarlarında maviye kaymaya neden olduğunu göstermiştir. Yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT)'ye dayalı hesaplanan emilim katsayıları, deneysel verilerle iyi bir uyum içindeydi. Ayrıca, farklı oksijen boşluklarına sahip %10 ağırlıkça Sn katkılı ITO'nun enerji bant yapıları, oksijen boşluklarının optik emilim katsayısına olan etkilerini hesaba katmak için yeniden hesaplanmıştır. Bant yapıları üzerindeki analizler, oksijen boşluklarının artırılmasının yalnızca Fermi enerji seviyesinin altında daha fazla bant oluşmasına yol açmadığını, aynı zamanda ikinci bant aralığına da katkıda bulunduğunu göstermiştir (Chen ve ark., 2014).

2014 yılında Li ve arkadaşları Ti tabakaları, ticari FTO camlar üzerine DC magnetron saçtırma ile biriktirmiş, ardından TiO₂/FTO çift tabakalı filmler hazırlamak için tüplü bir fırında eş zamanlı oksidasyon ve tavlama işlemi uygulamıştır. Tüm TiO₂/FTO çift tabakalı filmlerde büyük ve yoğun şekilde düzenlenmiş taneler

gözlemlenmiştir. TiO₂/FTO çift tabakalı filmlerde TiO₂ tetragonal rutil fazının varlığı XRD analizi ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak, 400 °C sıcaklık ve 15 sccm oksijen akış hızı benimsenerek oluşturulan TiO₂/FTO çift tabakalı film ile $2,30 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$ lik bir değerle optimum fotoelektrik özelliğe sahip olduğunu göstermiştir. FTO tek tabakalı film için ise bu değer $1,78 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu titanyumdioksit (TiO₂)/FTO çift tabakalı film üzerine DC magnetron saçtırma ile 500 nm kalınlığında bir AZO tabakası kaplandıktan sonra, üç tabakalı filmin değeri ise $3,12 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$ ile daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Bu değer sonuç olarak genel fotoelektrik özelliğin daha da iyileştirildiğini göstermektedir (Li ve ark., 2014).

2014 yılında Askari ve arkadaşları SiO₂'lerin cam alt tabaka üzerine kaplanması için optimize edilmiş DC magnetron saçtırma yöntemini, ITO düşük emisyonlu şeffaf kaplamalar elde etmek için kullanmıştır. Yüksek kızılötesi yansıma ve istenilen oranda elektrik direncini elde etmek için, önce uygulanan saçtırma gücünün etkisi, sonra oksijen akışı filmlerin özellikleri üzerinde incelenmiştir. Diğer kaplama parametreleri sabit tutulmuştur. 3 sccm oksijen akışında 400 °C sıcaklıkta film kaplama, şeffaf ve kızılötesi yansıtan kaplamalarla sonuçlanmıştır. Bu koşullar altında kızılötesinde elde edilen en yüksek ortalama yansıma ($\lambda=325 \mu\text{m}$) %89,5 olarak, optik geçirgenlik değeri ise yaklaşık olarak %85 olarak elde edilmiştir (Askari ve ark., 2014).

2014 yılında Banyamin ve arkadaşları FTO kaplamayı kalay oksit ve kalay florür tozu karışımları kullanılarak Ar/O₂ atmosferinde orta frekanslı darbeli DC magnetron saçtırma tekniği kullanılarak hazırlamıştır. FTO kaplamalar, cam alt tabakalar üzerine 400 nm kalınlığında biriktirilmiştir. Biriktirme sonrası tavlama işlemi gerçekleştirilmemiştir. Kimyasal bileşimin ince filmlerin yapısal (faz, tane boyutu), optik (geçirgenlik, optik bant aralığı) ve elektriksel (öz direnç, yük taşıyıcı, hareketlilik) özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Magnetron saçtırma ile FTO kaplamanın çevre dostu ve aynı zamanda düşük maliyetli bir teknik olduğu görülmüştür. En iyi film özellikleri, hedefte %12 SnF₂ ile %88 SnO₂ kütle oranı kullanılarak elde edilmiştir. Üretilen ince film, tetragonal kristal yapıya sahip polikristal olup, optimize edilmiş koşullar altında %83 ortalama görünür geçirgenliğe ve 3,80 eV optik bant aralığına, $6,71 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirence, $1,46 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı konsantrasyonuna ve 15 cm²/V.s mobiliteye sahip ince filmler elde edilmiştir (Banyamin ve ark., 2014).

2015 yılında Werner ve arkadaşları yüksek verimli ve uygun maliyetli PGH uygulamaları için geniş bantlı şeffaf arka elektrot olarak saçtırma yöntemi ile amorf indiyum çinko oksit (IZO) tabakasını üretmiştir. Bu IZO elektrot, 400-1200 nm dalga

boyu aralığında %3'ten azını emerken, levha direncine sahiptir. Hassas organik yük taşıma tabakasına doğrudan saçırma ile elde edilen IZO ile %9'dan fazla verimli yarı saydam PGH'ler elde edilmiştir. Verimlilik, alttaki organik tabakanın saçırma hasarını azaltan ince bir molibden oksit tampon tabakası eklenerek %10,3'e kadar yükseltilmiştir. Bu hücreler 800-1200 nm dalga boyu aralığında %60'tan fazla ortalama geçirgenlik göstermiş ve bu da onları tandem cihazlar için uygun üst hücre adayı olarak göstermektedir (Werner ve ark., 2015).

2016 yılında Hamrit ve arkadaşları çeşitli kalınlıklardaki nanoyapılı alüminyum katkılı ZnO (ZnO:Al) ince filmleri RF-magnetron saçırma tekniği ile esnek Poli-Etilen Naftalat (PEN) alt tabakalara ısıtmadan SİO üretmek için kaplamıştır. %2 [Al]/[Zn] oranına sahip sıkıştırılmış ZnO:Al nano tozu, süperkritik kurutma işlemiyle birleştirilmiş sol-jel yöntemiyle sentezlendi ve saçırma sisteminde bir hedef olarak kullanılmıştır. Çeşitli kalınlıklarda biriktirilen ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. XRD sonuçları, biriktirilen tüm ince filmlerin c eksenine sahip hegzagonal bir wurtzite yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) kesit görüntüleri, filmlerin yoğun bir sütun nanoyapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Filmlerdeki kompozisyonel elementlerin atomik yüzdesi, saçırma nanotoz hedefindekiyle hemen hemen aynı ve 500 nm'lik kritik bir kalınlığın altında ölçülmüştür. Filmler görünür bölgede yüksek bir geçirgenlik PEN substratının katkısı dahil %77) sergilediği görülmüştür. Bununla birlikte, elektriksel özdirenç, Hall hareketliliği ve taşıyıcı konsantrasyonu film kalınlığının artmasıyla önemli ölçüde etkilenmiştir. 500 nm'den daha yüksek kalınlıklar için, ince filmler benzer elektriksel özellikler ($3,5 \times 10^{-4} \Omega^{-1}\text{cm}$ özdirenç ve $22 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ Hall hareketliliği) sergilemiş ancak görünür bölgede geçirgenlik azalmıştır (Hamrit ve ark., 2016).

2016 yılında Park ve arkadaşları saçırma yöntemiyle ITO/Gümüş (Ag)/ITO çok tabakalı katotlar üzerine çözümlenmiş organik güneş hücresi (IOSC) modüllerini (10 cm x10 cm) üretmiştir. Bu çalışma çift tabakalı ITO hedefleri üzerine orta aralıklı frekans gücü ve Ag hedefi için doğru akım gücü ile donatılmış saçırma sistemi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek kaliteli ve 12 nm'lik Ag kalınlığında, ITO/Ag/ITO çok tabakalı film ile $3,03 \Omega/\text{sq}$ çok düşük bir tabaka direnci ve %88,17'lik yüksek bir geçirgenlik değeri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar amorf ITO film ile kıyaslandığında daha iyi değerlere ulaşılmıştır. Bu çalışma saçırma tekniğinin yüksek kaliteli şeffaf ve esnek katotların üretimi için umut verici bir kaplama süreci olduğunu göstermiştir (Park ve ark., 2016).

2017 yılında Hrostea ve arkadaşları ITO/altın (Au)/ITO, AZO/Au/AZO, tipi oksit tek tabakalı ve çok tabakalı şeffaf ince film yapılarının yapısal ve optik özellikleri üzerinde ısı işlemin etkisini incelemiştir. Tek tabakalı oksitler ve çok tabakalı yapılar, reaktif (oksit filmler için) atmosferde, In:Sn, Zn:Al, hedefler kullanılarak ardışık DC magnetron saçırma yoluyla cam alt tabakalar üzerine biriktirilmiştir. Öz direnci 10^{-4} Ω .cm ve geçirgenliği %75 olan iyi kalitede şeffaf iletken ince film yapıları elde edilmiştir (Hrostea ve ark., 2017).

2018 yılında McGhee ve arkadaşları saçırma kaplama tekniği ile ITO ve baskılı dielektrik yapıların nem algılama özellikleri, 10 ila 50 Ω /sq aralığında levha dirençlerine sahip numuneler için test edilmiştir. ITO/polimer kompozit sensörler, %5-%95 test edilen bir aralıkta bağıl nemi algılayabilen paralel plakalı kapasitif tabanlı bir nem sensörü oluşturmak için üretilmiştir. Sensörler %5 ile %75 bağıl nem arasında oldukça kararlı ve doğrusal bir tepki vermiştir. Kapasitif sensörler, nem izleyicileri olarak kabiliyetlerini ve performanslarını belirlemek için bir dizi teknik kullanılarak karakterize edilmiştir. Nem sensörlerinin tepki süresi ortalama 31,5 saniye olarak ölçülmüş ve toparlanma süresi kapasitif modda ortalama 31 saniyede ölçülmüştür. Sensörlerin etki mekanizmasını belirlemek için karmaşık empedans spektroskopisi kullanılmış ve bunun hem su moleküllerinin dielektrik tabakaya difüzyonu hem de dielektrik tabaka içindeki iyonik iletkenliğin artması olduğu bulunmuştur. Nem sensörlerinin kararlılığı yedi gün boyunca üç farklı nem seviyesinde test edilmiş ve sensörlerin bu zaman aralığında kararlı olduğu veya öngörülebilir bir değişim izlediği tespit edilmiştir (McGhee ve ark., 2018).

2018 yılında Wu, kapasitif tip dokunmatik ekran panelleri için elektrot olarak esnek ve şeffaf amorf-ITO/gümüş/kristal ITO (a-ITO/Ag/c-ITO) mimarisine sahip üç tabakalı yapıyı üretmiştir. İki ITO tabakası arasına çok ince bir Ag metal filmi yerleştirerek üç tabakalı yapılar saçırma yöntemi ile renksiz bir poliimid alt tabaka üzerine kaplanmıştır. a-ITO/Ag/c-ITO üç tabakalı yapıların ayarlanabilir elektriksel ve optik özelliklerinin eklenen Ag tabakasının kalınlığından kritik şekilde etkilendiği tespit edilmiştir. Optimize edilmiş esnek a-ITO/Ag/c-ITO üç tabakalı yapı düşük tabaka direncine, yüksek optik geçirgenliğe ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 30.000 bükme döngüsü sırasında esnek a-ITO/Ag/c-ITO üç tabakalı yapının direnç değişimi %4,12 idi. Çevresel güvenilirlik için, esnek a-ITO/Ag/c-ITO üç tabakalı yapının direnç değişimi değerleri sırasıyla 80 °C ve 40 °C ortam sıcaklığında %2,86 ve %0,96 idi. Bu sonuçlar, a-ITO/Ag/c-ITO üç tabakalı yapısının umut verici bir SiO elektrodu oluşturmak için kullanılabileceğini göstermiştir (Wu, 2018).

2019 yılında Sousa ve arkadaşları cam alt tabakalar üzerine ITO ince filmlerin RF magnetron püskürtmesinde argon çalışma basıncının, alt tabaka sıcaklığının, düşük güç plazma ışınlamasının ve hidrojenin kısmi basıncının etkisini incelemiştir. Bu çalışmada ısıya duyarlı alt tabakalar üzerine kaplama için düşük sıcaklıkta iyi kaliteli ITO filmleri elde etmek için en iyi koşulları belirlemeyi amaçlamıştır. Filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin kaplama parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın düşük basınçta ve oda sıcaklığında gerçekleştirildiği ITO filmleri, ~300 nm kalınlığında, 68 Ω/sq 'lik bir tabaka direnci ve görünür aralıkta yaklaşık %90'luk ortalama geçirgenlik göstermiştir. Ancak, argon çalışma basıncını biraz daha azaltarak veya düşük güçlü plazma ışınlaması uygulayarak veya çalışma gazına kısmi bir hidrojen basıncı ekleyerek, tabaka direncinde 3 faktöründe daha fazla iyileştirme elde edilmiştir. Düşük çalışma basınçlarında üretilen filmler kristalindir ve [222] tercihli yönelime sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu filmlerin iletkenliği ve geçirgenliği, yüksek basınçlarda biriktirilen filmlerden daha yüksektir. ITO ince filmlerinin elektriksel özdirenci, düşük güçlü plazma ışınlaması veya çalışma gazına kısmi bir H_2 basıncının eklenmesiyle keskin bir şekilde azalmıştır. Tüm filmler, görünür aralıkta %80'in üzerinde ortalama optik geçirgenlik göstermiştir (Sousa ve ark., 2019).

2020 yılında Demirhan ve arkadaşları polietilen tereftalat (PET) alt tabakalar üzerine ITO ince filmleri geniş alanlı rulodan ruloya DC magnetron saçtırma sistemi kullanılarak kaplanmasını gerçekleştirmiştir. Tüm kaplama süreci boyunca büyüme koşullarının film özelliklerine olan etkisini araştırmak için optik emisyon spektroskopisi (OES) analizi yönetilebilir bir şekilde gerçekleştirildi. Oksijen kısmi basıncının ve film kalınlığının filmlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerindeki sonuçları belirlenmiştir. Optik emisyon piklerinin yoğunluğunun deşarj gücüne ve O_2/Ar akış oranına tabi olduğu gösterilmiştir. Nispeten yüksek şeffaflığa ve düşük elektriksel özdirence ($R_s < 50 \Omega/\text{sq}$) sahip geniş alanlı, düzgün ITO filmleri PET alt tabakalar üzerine başarıyla kaplanmıştır. Farklı SİO ince filmlerin performansı üzerinde hem değer katsayısının hem de optik bant aralığı değerlerinin önemi ele alınmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, genel performansın ITO filmlerinin fotovoltaiik ve organik ışık yayan diyot (OLED) uygulamalarında uygulanması için yeterli olduğunu göstermektedir (Demirhan ve ark., 2020).

2021 yılında Pedroso ve arkadaşları oda sıcaklığında saçtırma yoluyla biriktirilen FTO filmlerin optik ve elektriksel özellikleri, flor içeriğini ve hidrojen atmosferini değiştirerek araştırılmıştır. Elde edilen filmlerin karmaşık davranışı, bu iki parametrenin

oluşturulan kusurlar üzerindeki birleşik etkilerini ortaya koyan geniş bir karakterizasyon teknikleri seti kullanılarak açıklanmıştır. Bu kusurlar elektriksel iletimi (taşıyıcı yoğunluğu, hareketlilik ve iletkenlik), optik özellikleri (bant aralığı ve kusurlarla ilgili emilim ve fotolüminesans) kontrol ederek ve son olarak numunelerin amorflaşmasını desteklemiştir. Saçtırma gazındaki H₂, filmlerdeki H içeriğini değiştirmemiş ancak kalayın kısmi indirgenmesini (Sn⁺⁴'den Sn⁺²'ye) ve bunun sonucunda değerlik bandına yakın sığ enerji seviyelerine sahip oksijen boşluklarının oluşmasını sağlamıştır. Saçtırma gazında uygun flor katkısı ve hidrojen fraksiyonu olan numunelerde elektriksel iletkenlikte dört büyüklük sırasına kadar bir değişim bildirilmiş ve mükemmel optik şeffaflık sağlanmıştır. Optimize edilmiş oda sıcaklığında yetiştirilen elektrotlar ~20 Ω/sq tabaka direncine ve >%90 optik şeffaflığa ulaşmıştır. Bu oda sıcaklığında kaplama işlemi, esnek ve büyük ölçekli elektroniklerde şüphesiz ilgi çeken aynı performansla PET gibi esnek organik alttaşlar üzerinde film hazırlanmasını sağlayabilecektir (Moran-Pedroso ve ark., 2021).

2021 yılında Winnicki ve arkadaşları yüksek güçlü darbeli magnetron saçtırma tekniğini düşük alttaş sıcaklığında ITO şeffaf ince filmlerin biriktirilmesi için kullanmıştır. Hibrit türdeki kompozit hedef malzeme, düşük basınçlı soğuk saçtırma işlemi ile kendi kendine hazırlanmıştır. Saçtırma işleminden önce In₂O₃ ve oksitlenmiş Sn tozları 3:1 hacim oranında karıştırılmıştır. 30-40 nm aralığında kalınlığa sahip (In₂O₃/Sn) ITO ince filmleri, 900 V'luk 300 biriktirme darbesi ve 900 saniyelik biriktirme süresinden sonra elde edilmiştir. In₂O₃/Sn filmleri 550 nm kalınlık, %88 oranında yüksek bir geçirgenlik ve 0,03 Ω.cm düşük özdirence sahip olarak elde edilmiştir (Winnicki ve ark., 2021).

2021 yılında Wang ve arkadaşları ITO/Ag/ITO (IAI) çok tabakalı yapıları, inorganik tüm katı hal elektrokromik hücreler için iletken şeffaf bir elektrot olarak DC magnetron saçtırma ile hazırlamıştır. İki tabaka ITO filmi arasına çeşitli kalınlıklarda ince bir Ag tabakası yerleştirilmiştir. XRD ve SEM sonuçları, Ag filminin mikroskobik morfolojisinin kalınlıkla yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, IAI çok tabakalı filmin elektriksel ve optik özellikleri, Ag katman kalınlığından önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Optimize edilmiş IAI çok katmanlıları, Ag filmi 10 nm kalınlığında olduğunda 54.05'lik bir değerle (6.14 Ω/cm²'lik tabaka direnci ve %90.83'lük optik geçirgenlik elektriksel ve optik özelliklerin en iyi kombinasyonunu göstermiştir. IAI çok katmanlı yapılarını elektrokromik uygulamalar için şeffaf bir elektrot olarak değerlendirmek amacıyla, ITO/NiO_x/LiPON/WO₃/ITO ve ITO/NiO_x/LiPON/WO₃/IAI

yapılarına sahip iki elektromik hücreler (ECD) hazırlandı ve elektro-optik özellikleri döngüsel voltametri, kronamperometri ve spektroskopik ölçümlerle karakterize edilmiştir. Saf ITO üst elektrotlu ECD ile karşılaştırıldığında, IAI üst elektrotlu ECD biraz daha küçük bir optik modülasyon genliği, ancak daha hızlı bir anahtarlama hızı sunmuştur. Tüm bulgularımız, IAI çok tabakalı yapısının inorganik tüm katı hal elektrokromik uygulamaları için ITO ince filmine umut verici bir alternatif olduğunu göstermektedir (Wang ve ark., 2021).

2021 yılında Han ve arkadaşları silikon heteroeklem (SHJ) güneş hücrelerinin performansını iyileştirmek amacıyla oda sıcaklığında radyo frekanslı magnetron saçırma yöntemi ile tungsten katkılı indiyum oksit (IWO) filmini optimize etmiştir. IWO'nun opto-elektriksel özellikleri, ince film silikon tabakalarının üzerine biriktirildiğinde geliştirilmiştir. Cam üzerinde optimum $2,1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ve $34 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'lük taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliği gösterirken, *i/n/cam* ve *i/p/cam* alt tabakalar üzerinde işlendikten sonra sırasıyla $2,0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ve $47 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve $1,9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ve $\text{cm}^2/\text{V.s}$ 'lük değerlere ulaşılmıştır. İnce film silikon yığınları üzerinde elde edilen SİO verileri kullanılarak yapılan optik simülasyon ile üretilen hücrelerde IWO tabanlı SHJ hücre yapısında umut verici bir görünür-yakın-kızılötesi optik tepkiyi göstermiştir. Ayrıca hücre üzerine ek bir magnezyum florür tabakası eklendiğinde, IWO tabanlı SHJ hücresi ile $1,48 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğu ile %22,92 hücresi verimliliği elde edilmiştir. Elde edilen IWO, ITO muadiliyle karşılaştırıldığında mutlak %0,98'lik bir verimlilik artışı elde edilmiştir (Han ve ark., 2021).

2021 yılında Yao ve arkadaşları yüksek kaliteli SİO elektrot geliştirerek yüksek performanslı n-tipi SHJ güneş hücreleri üretmek amacıyla n-tipi, SHJ güneş hücrelerinde düşük sıcaklıkta saçırma yöntemi ile titanyum katkılı indiyum oksit (ITiO) oksijen akış oranının bir fonksiyonu olarak geliştirilmiştir. Mikro yapı, morfoloji ve optoelektronik özellikler analiz edilmiştir. ITiO ince filmlerinin tane boyutu, oksijen akış oranı arttıkça hızla küçülmüştür. Bir ITO ince filmiyle karşılaştırıldığında, ITiO, film direncini azaltıp, zayıf emilimi koruyarak mükemmel optoelektronik özellikler elde edilmiştir. SHJ güneş pillerinde ön elektrot olarak ITO yerine ITiO ikame edilerek daha yüksek doldurma faktörü elde edilmiş ve %23,81 ile yüksek hücre verimliliği elde edilmiştir. Bu çalışma, ITiO'nun SHJ güneş hücreleri için umut vadeden bir SİO adayı olduğunu göstermiştir (Yao ve ark., 2021).

2022 yılında Chen ve arkadaşları saydam perovskite güneş hücreleri (ST-PGH'ler) için iletken ve şeffaf kontak olarak kullanılan ITO filmi saçırma yoluyla oda sıcaklığında

ITO/Ag/ITO ve ITO/Cu/ITO'nun sandviç yapısı, ST-PGH'ler için şeffaf arka kontak olarak üretmişlerdir. Metal ara tabakanın yüzey morfolojisi ve kalınlığının ayarlanmasıyla, ortalama görünür geçirgenliğin (380–780 nm dalga boyu aralığı) %92,6'ya kadar iyileştirilebileceği ve tabaka direncinin 15,0 Ω /sq'den düşük olduğu gösterilmiştir. İyi opto-elektriksel özelliklerden yararlanılarak, IAI ve ICI arka kontaklı ST-PGH'lerin hem kısa devre akım yoğunluğu hem de dolum faktörü sırasıyla yaklaşık 1,0 mA/cm² ve %10 oranında iyileştirilmiştir. ST-PGH'lerin hücre dönüşüm verimliliği, perovskite tabaka kalınlığı 488 nm'ye düşürülse bile %13,0'ın üzerinde elde edilmiştir. Cam alt tabakadan ve IAI arka temasından aydınlatılan bir ST-PGH için sırasıyla yaklaşık %15,8 ve %9,0 hücre dönüşüm verimliliği elde edilmiştir (Chen ve ark., 2022).

2022 yılında Reddy ve arkadaşları uzun vadeli, yüksek operasyonel kararlılığa sahip perovskite hücreleri geliştirilerek, verimli bir bariyer tabakası elde etmek ve büyük bozulmaları durdurmak amacıyla bariyer tabakası olarak ITO tabakasını saçırma yöntemiyle üretilmiştir. ITO bariyerli hücrelerin verimlilik kayıplarını azaltmak için ITO tabaka kalınlığı, hedef güç yoğunluğu ve çalışma basıncı gibi çeşitli saçırma işlemi parametreleri optimize edilmiştir. Yeni ITO bariyer optimizasyonuna dayalı olarak üretilen düzlemsel ters mimari PGH'ler ile 0,09 cm² aktif hücre alanında %19,05'lik bir enerji dönüşüm verimliliği (PCE) elde edilmiştir. Kapsüllenmiş hücreler, 55 °C'de 1400 saatlik sürekli aydınlatma altında başlangıç verimliliklerinin >%80'ini ve dış ortam koşullarında ise 1500 saatlik depolamadan sonra başlangıç PCE'lerinin %94,5'ini koruduğu görülmüştür. Böyle bütünsel bir stabilizasyon yaklaşımının kullanılmasıyla, kapsülleme olmaksızın PGH mini-modülleri, 2,28 cm² hücre alanında %16,4 oranında verim değerine ulaşılmış ve dış ortam koşullarında 85 °C'de 350 saat boyunca termal gerilmeden sonra başlangıç performansının yaklaşık %80'ini koruduğu tespit edilmiştir (Reddy ve ark., 2022).

2022 yılında Badgujar ve arkadaşları fotonik, algılama ve fotovoltaik aygıtlarda şeffaf iletken elektrot olarak uygulama bulan popüler, düşük maliyetli, toksik olmayan bir malzeme olan AZO, herhangi bir alt tabaka ısıtması olmadan doğru akım magnetron saçırma ile elde etmişlerdir. Saçırma işlemi sırasında oksijen içeriğinin optimize edilmesiyle yüksek optoelektronik özellikler elde edilmiştir. Soğuk püskürtmeli AZO filmlerinin yapısal, morfolojik, optoelektrik ve fotoluminesans özellikleri araştırılmıştır. 8,8 Ω /sq elektrik levha direncine ve %95'in üzerinde kalınlık düzgünlüğüne sahip %78,5 görünür ışık geçirgenliğine sahip AZO ince filmleri 300 mm × 300 mm cam alt tabaka üzerinde elde edilmiştir. Optimize edilmiş işlem koşullarına sahip AZO filmi, %11,8

enerji dönüşüm verimliliği gösteren bakır-indiyum-galyum-selenür bazlı ince film güneş hücresi üretmek için şeffaf bir elektrot olarak kullanılmıştır. Optimize edilmiş saçırma koşullarına sahip AZO filmi, Al^{+3} tüketimi ve nokta kusurları nedeniyle oluşan kusurların uygun şekilde düzenlenmesiyle direnci bastırmak için ortam koşullarında bir Al örtüsüyle son işleme tabi tutulmuş ve bunun sonucunda kızılötesi bölgede $40 \Omega/sq'$ lik bir tabaka direnciyle iyileştirilmiş (%85) geçirgenlik elde edilmiştir (Badgujar ve ark., 2022).

2023 yılında Yang ve arkadaşları harici bir gaz ısıtma cihazı kurulmuş ve saçırma gazı (Argon) ısıtması yoluyla hazırlanan ITO filmlerinin ısıl işlem teknolojisi geliştirilmiştir. Altı ITO filmi, Ar'yi ısıtan harici bir mufla fırını kullanılarak oda sıcaklığında, $200 \text{ }^\circ\text{C}$, $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $400 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de magnetron saçırma yoluyla hazırlanmıştır. Ar sıcaklığının ITO filmlerinin yapısı, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Saçırma gazı sıcaklığı arttıkça saçırma hızının kademeli olarak arttığı ve aynı saçırma süresi boyunca ITO film kalınlığının hafifçe arttığı bulunmuştur. Aynı film kalınlığı için, daha yüksek saçırma gazı sıcaklığında hazırlanan ITO filmleri daha iyi fotoelektrik performansına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ar sıcaklığı arttıkça ITO filminin yüzey yapısı kademeli olarak yoğunlaşmıştır. Kristalit boyutları nispeten düzgün kalmış, özdirenç kademeli olarak azalmış ve geçirgenlik kademeli olarak artmıştır. Bu deneyde en iyi performansı gösteren ITO filmlerinin özdirenci $2,45 \times 10^{-4} \Omega.cm$ ve 300 ile 800 nm arasındaki ortalama geçirgenlik değeri %90,62 olarak bulunmuştur. Sonuçlar, Ar ısıtma yoluyla hazırlanan ITO filmlerinin ısıl işlem sürecinin, düzgün ısıtma ve eş zamanlı ısıtma ve vakumlama elde edebilen kullanışlı bir yöntem olduğunu göstermiştir (Yang ve ark., 2023).

2023 yılında Seyhan ve arkadaşları, özellikle ITO ve indiyum çinko oksit'ten (IZO) oluşan çok tabakalı SİO yapıların SHJ güneş hücreleri için potansiyelini araştırmıştır. Çeşitli sıcaklıkları altında çeşitli ince film yapıları biriktirmek için RF magnetron saçırma yöntemi kullanılmış ve elektriksel, optik ve morfolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Tek tabakalı ince filmlere göre daha düşük tabaka dirençlerine ve daha yüksek geçirgenliklere sahip filmler elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de biriktirilen ITO/IZO/ITO/IZO/ITO çok tabakalı film yapısının $18,5 \Omega/sq'$ lik en iyi tabaka direncine ve 550 nm dalga boyunda %90'ın üzerinde yüksek bir optik geçirgenliğe ulaştığı tespit edilmiştir. Bu çalışma ile çok tabakalı SİO yapılarının optik ve elektriksel olarak daha verimli olma potansiyeline sahip olduğunu ve optoelektronik cihazların performansını artırabileceğini göstermiştir. Son olarak, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ön SİO olarak biriktirilen bir ITO/IZO/ITO/IZO/ITO çok katmanlı film yapısı kullanılarak üretilen bir

SHJ güneş hücresi ile %17,46'lık bir enerji dönüşüm verimliliği elde edilmiştir (Seyhan ve ark., 2023).

2024 yılında Huo ve arkadaşları SnO₂ ve tantal katkılı SnO₂ (TTO) ince filmleri, cam alt tabakalar üzerinde reaktif içi boş katot gaz akışlı saçtırma kullanılarak hazırlamıştır. Saçtırma işleminden önce vakum altında yerinde bir ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalay oksit filmlerin özdirenci, $2,55 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı konsantrasyonu ve $12,11 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ mobilite ile $2,02 \times 10^{-3} \Omega.\text{cm}$ gibi dikkate değer bir değere düşürülmüştür. Alt tabaka sıcaklığı arttıkça film özdirenci azalmıştır. Özellikle 270 °C'lik bir alt tabaka sıcaklığında, Ta katkılanması ile film özdirencinin taşıyıcı konsantrasyonu üzerindeki etkisi, daha yüksek sıcaklıklara kıyasla önemli ölçüde daha güçlü olmuştur. Alt tabaka sıcaklığının ve Ta katkılanmasının artırılması, daha düşük bir kırılma indisi (n) ile sonuçlanmıştır. Bu etki, daha düşük sıcaklıklara ($2,35 \times 10^{20} \text{ cm}^2/\text{V.s}$) kıyasla daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna ($4,54 \times 10^{20} \text{ cm}^2/\text{V.s}$) atfedilen daha yüksek sıcaklıklarda sürekli olarak güçlü olduğu tespit edilmiştir (Huo ve ark., 2024).

2024 yılında Robb ve arkadaşları kaplama sırasında gaz akışının oksijen bileşimini stratejik olarak kontrol ederek oda sıcaklığında, RF magnetron püskürtmeli ITO'nun elektriksel iletkenliğini ve optik geçirgenliğini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamıştır. Saf argon altında püskürtülen ITO ve argon:oksijen atmosferinde püskürtülen ITO çift tabakanın oluşumunun, optik geçirgenlik üzerinde minimum etkiyle gelişmiş elektriksel iletkenlikle sonuçlandığı bulunmuştur. Bu sonucun, elektronların alttaki, daha iletken, saf argon püskürtmeli tabakadan en az dirençli yolu izlemesinden kaynaklandığına inanılırken, üstteki oksijen püskürtmeli tabaka daha yüksek optik şeffaflık sağlamaktadır. Her iki alt tabakada (kuvars ve PET) başlangıçta oksijensiz bir ITO tabakanın eklenmesi üzerine filmlerin tabaka direncinde önemli azalmalar bulunmuştur. Ayrıca, magnetron saçtırma sırasında oksijen konsantrasyonunun artırılmasının filmlerin şeffaflığında bir artışa yol açtığını, maksimum şeffaflığın %2 oksijende elde edildiğini ve ardından azaldığı tespit edilmiştir. Ar altında püskürtülen bir başlangıç ITO tabakasının eklenmesi, başlangıç Ar ITO tabakası olmayan bir filmle karşılaştırıldığında filmlerin gözlenen geçirgenliğinde önemli bir azalmaya neden olmamıştır. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklıklarda son tavlama ihtiyacı olmadan esnek ve düşük maliyetli alt tabakalar üzerine düşük dirençli ITO ince filmlerin biriktirilmesi potansiyelini göstermektedir (Robb ve ark., 2024).

2024 yılında Jiao ve arkadaşları indiyum filminin fotoelektrik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için doğru akım magnetron saçtırma teknolojisi kullanılarak ITO/In/ITO filmleri üretmiştir. Elektriksel performans analizlerinden, indiyum tabakanın kalınlığı 12 nm olduğunda $6,830 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ bir öz direnç ve %89,5 ortalama geçirgenliğine sahip olduğunu göstermiştir. ITO/In(12 nm)/ITO konfigürasyonu, yaklaşık $101,09 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ ile en yüksek performansı sergilemiştir. ITO ve In, ışık yansımaya neden olmadan taşıyıcı hareketliliğini artıran ve böylece geçirgenliği artıran benzer bir arayüzü paylaşır. Öz direnç, taşıyıcı konsantrasyonu ve hareketliliğe dayanarak, In katmanının püskürtülmesinin ITO filminin elektriksel özelliklerini artırdığı bu çalışma ile gösterilmiştir (Jiao ve ark., 2024).

2024 yılında Zhu ve arkadaşları Sb-doped SnO₂ (ATO) filmleri, iki farklı O₂ akış hızı altında farklı RF güçleriyle magnetron saçtırma ile hazırlamış ve daha sonra hızlı termal tavlama (RTA) işlemine tabi tutmuştur. Elde edilen filmlerin kristalinitesi, gerilimi, yüzey morfolojisi, iletken özellikleri, görünür ışık aralığındaki geçirgenliği (TV_{is}) ve E_g değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir. RF arttıkça, filmin kristalinitesinin önce iyileşerek daha sonra hafif bozulduğu ve basınç geriliminin azaldığı görülmüştür. İletkenlik özellikleri önemli ölçüde iyileşerek E_g değeri artmıştır. Sonuç olarak ATO filmleri, optimize edilmiş RF aralığında %76,35-80,86'lık geçirgenliğe 51,7-91,9 Ω/sq 'lik tabaka direncine ve $1,03-1,67 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 'lik kalite faktörüne sahip olduğu tespit edilmiştir (Zhu ve ark., 2024).

2024 yılında Damgacı ve arkadaşları monolitik HJT/perovskite tandem güneş hücrelerindeki ITO filmleri üzerinde sıcaklık optimizasyonunun etkisi incelemiştir. ITO filmleri, oda sıcaklığı 25 ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda magnetron saçtırma kullanılarak biriktirilmiştir. Saçtırma hedefi olarak %90 ila %10'luk bir In₂O₃/SnO₂ kütle oranına sahip ITO kullanılmıştır. Sıcaklığın ITO filmi üzerindeki etkileri, XRD, spektroskopik elipsometri ve tabaka direnci ölçümleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, tüm ITO filmlerinin polikristalin bir morfoloji sergilediğini, kırınım tepelerinin (211), (222), (400), (440) ve (622) düzlemlerine karşılık geldiğini ve kübik bir bixbyte kristal yapısını gösterdiğini göstermiştir. Işık geçirgenliği %80'i aşmış ve 200 °C'de biriktirilen ITO için tabaka direnci 75,1 Ω/sq elde edilmiştir. Biriktirilen ITO filmlerinin optik bant aralığı 3,90 eV ile 3,93 eV arasında değişkenlik göstermiştir. Perovskite güneş hücresinin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu XRD ve FE-SEM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tandem güneş hücresi performansı, simüle edilmiş güneş ışığı altında akım yoğunluğu-gerilim özelliklerinin analiz edilmesiyle değerlendirilmiştir. ITO

biriktirme sıcaklığının optimize edilmesiyle, tandem hücre %16,74'lük bir PCE elde edilmiştir (Damgaci ve ark., 2024).

2024 Yılında Balaji ve arkadaşları amorf ve kristal oksit yarı-iletkenler kullanılarak şeffaf güneş hücresi imalatına odaklanmıştır. FTO/n-indiyum galyum çinko oksit/p-nikel oksit/gümüş nano teller ve FTO/n-ITO/p-nikel oksit/gümüş nanoteller ile güneş hücrelerin üretiminde RF magnetron saçtırma tekniği kullanılmıştır. n ve p tipi yarı-iletkenler için biriktirme koşulları optimize edilmiş ve analiz edilmiştir. Gümüş nanoteller üst temas noktaları olarak spin tekniği ile kaplanmıştır. Güneş hücreleri 365 nm dalga boyuna sahip ışınımına maruz bırakılmış ve akım voltaj karakteristikleri analiz edilmiştir. Amorf oksit yarı-iletken kullanılan bu yeni yaklaşım ile yüksek verimli güneş hücresi üretilebileceği rapor edilmiştir (Balaji ve ark., 2024).

2024 yılında Yan ve arkadaşları giyilebilir akıllı cihazların geçirgenliklerini, iletkenliklerini ve genel işlevselliklerini artırmak amacıyla FTO filmleri magnetron saçtırma yöntemiyle hazırlamıştır. Bu çalışmada, plazmadaki O₂ gaz akışının üretilen filmlerin özellikleri üzerindeki etkileri ve mekanizması incelenmiştir. Film morfolojilerinde küçük değişiklikler gözlemlenmiştir; tercih edilen yönelimler polar (101) ile polar olmayan (110) ve standart konumlara kaymıştır. O₂ akış hızı 0'dan 2 sccm'ye arttıkça, filmin görünür spektrumdaki geçirgenliği %83'ten %89'a yükselmiş ve tabaka direnç değerleri 10²-10⁶ Ω·sq⁻¹ mertebesinde olmuştur. Asidik bir çözelti içerisine daldırmanın ardından, O₂ içermeyen film soyulurken, 1 veya 2 sccm O₂ içeren filmlerde birkaç korozyon çukuru gözlemlenmiştir. Buna karşılık, alkali bir çözelti içerisine daldırma sonrasında, O₂ içermeyen filmlerde birkaç korozyon çukuru gözlemlenirken, diğer filmler mükemmel korozyon direnci göstermiştir. Farklı çözeltilere daldırılan filmlerin geçirgenliği önemli ölçüde farklılık göstermemiştir. Özellikle, 1 sccm O₂ ile işlenen filmlerin tabaka dirençleri, 3000 Ω'luk endüstriyel gereksinimi karşılamıştır. Ayrıca polar ve polar olmayan düzlemlerin bir arada bulunması, 1 sccm O₂ ile işlenen FTO filmlerin şeffaflık ve iletkenliklerinde kararlılık sağlanmıştır. Bu çalışma yalnızca geçirgenliği ve korozyon direncini artırmayı değil, aynı zamanda giyilebilir akıllı elektronik bir cihazın dış ekran tabakasının iletkenliğinin korunması da amaçlanmıştır (Yan ve ark., 2024).

Burada rapor edilen literatür çalışmaları göstermiştir ki; son yıllarda, şeffaf ve iletken film teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemelerin performansını artırma ve çeşitli uygulamalarda verimliliğini iyileştirme üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan araştırmalar, özellikle FTO ve ITO filmlerinin üretim ve özelliklerini optimize etme

abalarını içermektedir. Magnetron saçtırma teknikleri kullanılarak amorf ve kristal oksit yarı-iletkenlerin Şeffaf güneş hücrelerinde ve diğer optoelektronik aygıtlarda yüksek verim sağladığı ve film morfolojilerindeki ince ayarlarla geçirgenlik ve elektriksel direncinin iyileŐtirildiđi bulunmuştur. Bu alıŐmalar, malzeme özelliklerinin optimize edilmesiyle güneş hücrelerinin ve akıllı cihazların performansını artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Geliştirilen teknikler, bu malzemelerin hem enerji verimliliği hem de iŐlevsel uygulamalarda daha geniş kullanım alanlarına olanak tanımaktadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

ITO ve FTO elektrotlar uygun alttaşlar (soda-lime) üzerine homojen büyümeye ve kalınlık kontrolüne imkân sunan magnetron saçtırma tekniği ile büyütülmüştür. Bu noktada belirli parametreler (optik geçirgenlik, elektriksel direnç, yüzey pürüzlülüğü, film kalınlığı, vb.) gibi analiz edilerek optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonrasında elde edilen veriler ışığında ITO ve FTO tabakaları için üretim haritası belirlenmiş ve hem optimum koşullarda üretim reçeteleri oluşturulmuş hem de ilerleyen süreçte ihtiyaca uygun tasarım yapma kabiliyeti kazanılmıştır. Saçtırıcı hedeflerin (target) alımı gerçekleştirildikten sonra ilgili tabakaların üretimi saçtırma tekniği ile yapılmıştır. Üretilen iletken geçirgen elektrotların yapısal analizi XRD ölçümü ile yapılmıştır. Yüzey morfolojisi/topografisi ölçümleri SEM ve AFM analizleri ile incelenmiştir. Üretilen iletken geçirgen elektrotların kalınlık değerleri kesit alan SEM görüntülerinden ve/veya profilometre analizlerinden belirlenmiştir. İlgili tabakaların optik analizleri ise spektrofotometre cihazı ile belirlenmiştir. Üretilen tabakaların yük taşıyıcı tabaka olarak kullanımını ön plana çıkaran parametreler ise geçirgenlik ve elektriksel direnç parametreleri ile belirlenmiştir. Yük transfer tabakaları için uygun parametreler farklı atmosfer koşulları ve büyütme parametrelerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak belirlenmiştir. Optimum şartlarda üretilen ITO ve FTO filmlerin PGH alt elektrot olarak kullanılması da bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Üretilen hücrelerin fotovoltaj performansını belirlemek amacıyla akım-voltaj (I-V) ve dış kuantum verimlilik (EQE) analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili tabakaların etkinliğini belirlemek amacı ile diğer tabakalar standart koşullarda üretilmiştir.

Basit bir PGH yapısı; (i)- saydam iletken bir alttaş, (ii)- elektron transferinden sorumlu bir elektron transfer tabakası (ETL) tabakası, (iii)- soğurmanın gerçekleştiği ve yük üretiminin meydana geldiği bir perovskite tabakası, (iv)- boşlukların iletiminden sorumlu bir boşluk transfer tabakası (HTL) tabakası ve (v)- metal üst kontak olmak üzere beş farklı tabakadan oluşmaktadır. Gerek yapılan yoğun literatür taramalarından gerekse kazanılan deneyimlere dayanarak her bir tabaka için uygun üretim ve büyütme parametreleri (başlangıç materyalleri, üretim sıcaklığı, kalınlık değeri, vb.) belirlenmiştir. Üretilen hücrelerde SİO elektrotların etkisini açık bir şekilde belirlemek amacıyla tüm tabakalar standart koşullarda elde edilmiştir. Tez çalışmasının elektrot üretimi kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 3.2. VAKSİS MİDAS 3M1T magnetron saçırma sistemi.

Sistem içinde yer alan magnetron üzerine 3” çapında ve 0,125” kalınlıktaki bakır plaka üzerinde 0,125” kalınlıkta %99,99 saflıkta ITO/FTO hedef malzemesi yerleştirilmiştir. Aşağıdan yukarıya doğru saçırma işlemi için uygun olan sistem içine örnek tutucu kaplanacak yüzey aşağı bakacak şekilde üst kısma yerleştirilmiştir. Daha sonra sistem vakum işlemi için çalıştırılmıştır. Vakum seviyesi 5×10^{-7} Torr (mm-Hg) veya daha aşağı seviyelere indikten sonra büyütme işlemi için süreç başlatılmıştır.

3. Karakterizasyon: Büyütme sonunda sistemden çıkarılan malzemeler üzerinden 1 cm mesafe için avometre ile direnç okunmuş ardından tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerek tavlama öncesi gerek tavlama sonrası 1 cm mesafe için okunan direnç referans alınarak optimizasyon yapılmıştır. Elde edilen değerlerden sonucu iyi olanlar için

karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Karakterizasyon işlemlerinde yüzey topolojileri hakkında bilgi edinebilmek örneklerin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ 'lik yüzeyi, Park System XE7 AFM ile incelenmiştir. Morfolojik karakterizasyon için ZEISS GeminiSEM 500 FESEM ile 50000, 100000 ve 200000 büyütme altında görüntüler elde edilmiştir. Filmetrics Profilm 3 Profilometre ile gölge maske ile maskelenen bölgelerdeki basamak üzerinde optik girişim deseni elde edilerek yaklaşık kalınlıklar hesaplanmıştır. UV-Vis karakterizasyonları Shimadzu UV-3600 Plus Spektrofotometresinde gerçekleştirilmiştir. Bu analizden SİO filmler için oldukça önemli olan geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Ölçüm aralığı 300 – 800 nm olarak belirlenmiştir. Filmlerin kristal yapı analizleri için PANalytical EMPYREAN XRD cihazında $\text{CuK}\alpha = 0,1541874$ nm dalga boylu karakteristik X-ışını ile $10-90^\circ$ arasında ve $0,01^\circ$ adımlarla, $5^\circ/\text{dakika}$ tarama hızında ve yüzey ile X-ışını arasındaki açı (w), 1° olacak şekilde ölçüm alınmıştır. Son olarak 4-nokta prob sistemi (Four Point Probe – FPP) ile tabaka direnci hesaplanmıştır. Bu ölçümde birbirinden 1 mm arayla durmakta olan 4 tane pin malzeme yüzeyine temas eder. En dışta bulunan pinlerden akım sürülürken iç kısımda yer alan iki pinden eş zamanlı gerilim okunur. Daha sonra yüzey direnci için kullanılan denkleme yerlerine konularak yüzey direnci cihaz tarafından hesaplanır. Bunun için Kietley 2450 Sourcemeter'a FPP script yüklenmiş ve Lucas Lab FPP sistemine bağlanmıştır. Ölçümler 10 mA akım altında direkt pogo pinlerin malzeme yüzeyine temas etmesi ile alınmıştır. Harici bir kontak kullanılmamıştır. Yüzey direnci hesaplamak için kullanılan denklem:

$$\sigma = 4,532 \frac{V}{I} k$$

Olup; burada I akımı, V gerilimi ve k, düzeltme faktörünü temsil etmektedir.

Hem ITO hem de FTO filmler için büyütme parametreleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. ITO ve FTO filmler için büyütme ve büyütme sonrası tavlama parametreleri

Kodlama	Kaynak (DC/RF)	Güç (W)	Basınç (Torr)	Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)	O ₂ akış (sccm)	Ar akış (sccm)	Tavlama (°C)	Süre (dakika)
ITO-1	RF	78	6,1 x 10 ⁻³	RT	35	1,5	50	300	60
ITO-2	RF	77	8 x 10 ⁻³	150	35	1	49	450	60
ITO-3	RF	77	8 x 10 ⁻³	150	35	1	49	450	5
ITO-4	DC	233	5 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	300	30
ITO-5	DC	233	5 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	300	5
ITO-6	DC	233	5 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	450	30
ITO-7	DC	233	5 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	450	5
ITO-8	DC	233	5,3 x 10 ⁻³	RT	30	1	50	300	30
ITO-9	DC	233	5,3 x 10 ⁻³	RT	30	1	50	300	5
ITO-10	DC	350	5,1 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	300	30
ITO-11	DC	350	5,1 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	300	5
ITO-12	DC	350	5,1 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	450	30
ITO-13	DC	350	5,1 x 10 ⁻³	RT	30	0	50	450	5
FTO-1	RF	137	5,5 x 10 ⁻³	150	20	0	50	-	-
FTO-2	RF	135	5,3 x 10 ⁻³	150	60	0	50	-	-
FTO-3	RF	137	5,4 x 10 ⁻³	150	60	3	45	450	20
FTO-4	RF	137	5,4 x 10 ⁻³	150	60	3	45	450	20
FTO-5	RF	137	5,4 x 10 ⁻³	150	60	3	45	450	20
FTO-6	RF	137	5,5 x 10 ⁻³	RT	60	3	45	450	20
FTO-7	RF	137	5,5 x 10 ⁻³	RT	60	3	45	450	20
FTO-8	RF	137	5,5 x 10 ⁻³	300	60	3	45	450	20
FTO-9	RF	137	5,5 x 10 ⁻³	300	60	3	45	450	20
FTO-10	RF	137	5,6 x 10 ⁻³	150	60	3	45	450	20
FTO-11	RF	137	5,6 x 10 ⁻³	150	180	3	45	450	20
FTO-12	RF	137	5,6 x 10 ⁻³	150	60	3	45	450	20

Optimum parametrelerde elde edilen FTO ve ITO filmlerin kullanıldığı hücre üretim aşamaları aşağıda sunulmuştur.

Gerek ticari gerekse tez çalışması kapsamında üretilen FTO ve ITO cam altlıklar sırasıyla deterjan solüsyonu, saf su, aseton ve etanol ile ultrasonik banyoda tutularak temizlenmiştir. Ardından UV-ozon işlemine tabi tutularak tüm organik kirlere arındırılmıştır. Yaklaşık 30-nm-kalınlıkta kompakt TiO₂ (c-TiO₂) tabakası oksijen gazı aracılığı ve spray pyrolysis (püskürtme) tekniği ile 450 °C sıcaklıkta temiz alttaşların

yüzeyine kaplanmıştır. Başlangıç kimyasalı olarak kullanılan titanyum diizopropoksit bis(asetilasetonat) etanol içerisinde hacimce 1:9 oranında seyreltilerek hazırlanmıştır. Saçırma işlemi için basit ticari bir saçırma tabancası (nozzle) kullanılmış ve saçırma işlemi sonrası yine 450 °C sıcaklıkta 15-20 dk süre ile tavlama işlemine bırakılan alttaşlar oda sıcaklığına soğutularak bir sonraki işlem için hazır hale getirilmiştir. Oda sıcaklığına soğutulan c-TiO₂ tabakalı alttaşların yüzeylerine döndürerek kaplama (spin-coating) tekniği ile mezoporoz TiO₂ (mp-TiO₂) çözeltisi kaplanmış ve 450 °C sıcaklıkta 30 dk süre ile yeniden tavlama işlemine maruz bırakılmıştır. Tavlama işlemi sonrasında perovskite tabakasının kaplanması için mp-TiO₂ kaplı alttaşlar <math><2\%</math> neme sahip (çiğlenme noktası <math><-30\text{ }^\circ\text{C}</math>) kuru-hava atmosferli glove-box içerisine transfer edilmiştir. Isıl işlem sonrasında perovskite filmler 0.05 M CsI, 0.85 M FAI, 0.15 M MABr, 0.85 M PbI₂ ve 0.15 M PbBr₂'nin dimetilformamid: dimetilsülfoksit (DMF:DMSO) (hacimce 4:1) çözücü karışımı içerisindeki solüsyonlarının ETL tabaka üzerine iki basamaklı biriktirilmesi ile üretilmiştir. Perovskite büyütme işlemi de döndürerek kaplama tekniği ile tek-adımlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi 10 sn 2000 rpm hızında ve 30 sn 6000 rpm hızında olacak şekilde iki adımda gerçekleştirilmiştir. İkinci aşama sırasında kristallenmeyi başlatmak için perovskite tabaka üzerine bir miktar (~200 µl) klorobenzen enjekte edilmiş ve böylece film içerisindeki tüm eş-çözücüler (co-solvents) uzaklaştırılmıştır. Ardından, 100 °C'de 1 saat tavlama işlemine tabi tutulmuştur. 70 mM konsantrasyonlu 2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-methoxyphenyl)amino]-9,9'-spirobifluorene (spiro-OMeTAD) çözeltisi klorobenzen içerisinde Li-TFSI (1 mL asetonitril içerisinde hazırlanan 520 mg Li-TFSI stok çözeltisinden) ve tBP katkı maddelerinin de eklenmesiyle hazırlanmıştır. Spiro-OMeTAD:Li-TFSI:tBP konsantrasyonu molar olarak 1.0:0.5:3.3 oranında hazırlanmıştır. Spiro-OMeTAD çözeltisi perovskite filmin üzerine döndürerek kaplama tekniği ile büyütülmüştür. Tüm HTL film kaplama işlemi 20 sn 4000 rpm olarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak metal kontak elektrot (Au ya da Ag) termal buharlaştırma yöntemi ile HTL üzerinde yaklaşık 100 nm biriktirilmiştir. PGH aygıtlarının fotovoltaj performanslarının incelenmesi için akım yoğunluğu-voltaj eğrisi (J-V) sırasında, yarı-iletken karakterizasyon sistemi ve birim alan başına belirli güçte foton gönderebilen ışık kaynağı (AM 1.5 G güneş simülatörü) kullanılmıştır. Işık kaynağı olarak 450 W gücünde Xenon lamba kullanılmıştır. Hücreler, aktif alanı belirlemek amacıyla kalibre edilmiş açıklık alanı 0.09 cm² olan ve yansıtıcı olmayan siyah metal maske ile kapatılmıştır. AAA sınıf Abet Sun3000 solar simulator kullanılarak üretilen fotoakım Keithley 4200 sourcemeter ile kaydedilmiştir. Böylece aygıtlara ait açık devre

gerilimi (V_{oc}), dolun faktörü (FF), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), maksimum aygıt verimliliği (PCE_{max}) ve ortalama aygıt verimliliği (PCE_{avg}) gibi fotovoltaiik parametreler açığa çıkarılmıştır. Ayrıca, zamana bağılı maksimum güç noktası (MPP) izleme ve tekrarlanabilirlik histogramları (en az 5 hücre) analiz edilmiştir. Üretilen hücrelerin dalga boyunun bir fonksiyonu olarak EQE, yük-foton-akım verimliliği, (IPCE) spektrumları ve integre kısa devre akım yoğunluğu değerleri 150 W Xenon lambaya sahip PV Measurements QEX10 marka IPCE sistemi ile kaydedilmiştir. Tüm fotovoltaiik sonuçlar, ticari elektrotların kullanıldığı referans hücreler ile mukayese edilmiştir.

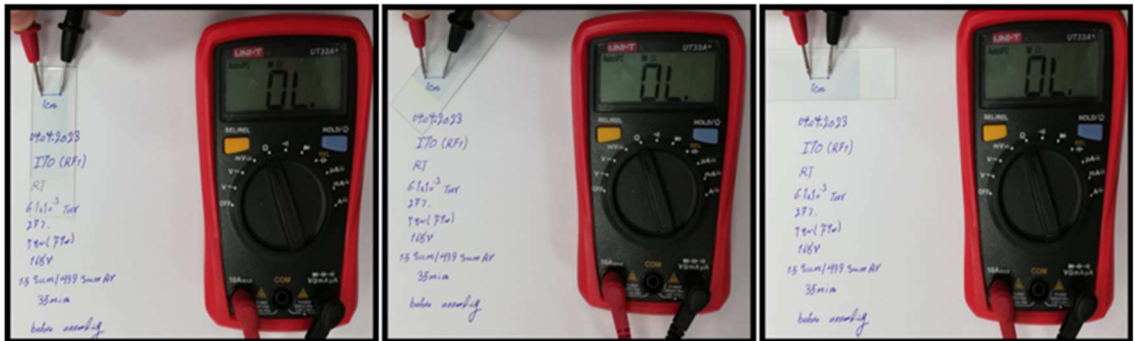


4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında üretilen ITO ve FTO filmlerin optimizasyon çalışmaları ve elde edilen analiz sonuçları aşağıda sunulmuştur. İlgili elektrotların kullanıldığı hücrelere ait fotovoltaiik analiz sonuçları da bu bölümde sunulmuş ve sonuçlar ticari elektrotların kullanıldığı hücreler ile kıyaslanarak tartışılmıştır.

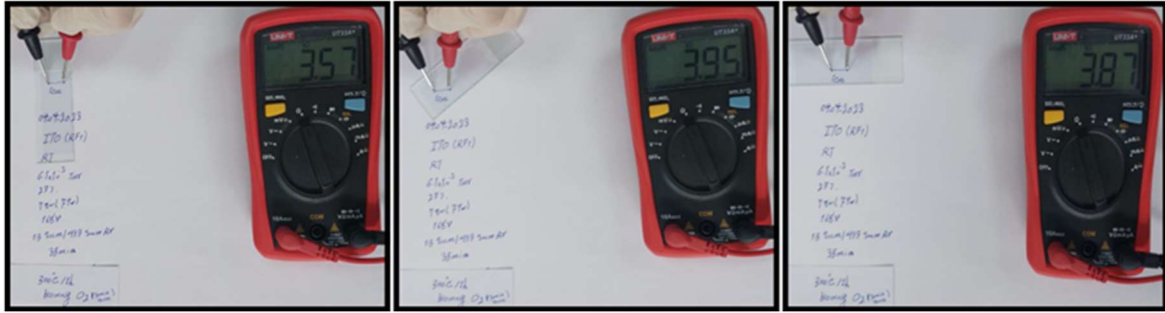
4.1. ITO Elektrot Üretim ve Karakterizasyon Çalışmaları

ITO üretimlerinde ilk olarak daha büyük kristalite boyutlarına sahip yapı elde etmek için RF güç kaynağı kullanarak düşük güç değerlerinde üretim yapılmıştır. Bunun için belirlenen güç ~ 78 W olup basınç değeri sistem için ideal kabul edilen 5×10^{-3} Torr değerinden daha büyük tutulmuştur. Bunun nedeni daha düşük basınçlara inildiğinde plazma yoğunluğunun dalgalanması ve aniden gidip gelmesidir. Bu üretimler hem oda sıcaklığı (RT) hem de 150 °C alttaş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Üretimler esnasında ortama çok az miktarda oksijen girişi sağlanmış ve yapıda meydana gelebilecek oksijen eksikliklerinin giderilmesi amaçlanmıştır. Sistemden çıkarılan ITO kaplı camların dirençleri ölçülmüş ve ardından atmosfer ortamında tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu tavlama işlemleri hem 300 °C’de hem de 450 °C’de gerçekleştirilmiştir. 450 °C’de gerçekleştirilen tavlama işlemi iki farklı zaman için gerçekleştirilmiştir. Üretilen ITO filmlere ilişkin elektriksel ve optik ölçümler Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



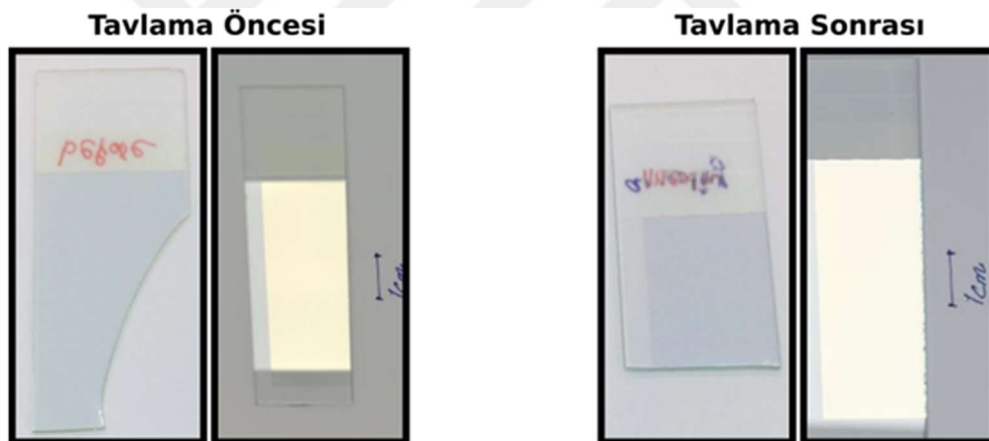
Şekil 4.1: ITO-1 örneğinin tavlama öncesi farklı noktalardan alınan elektriksel direnç ölçümleri

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere filmler üzerinde herhangi bir elektriksel direnç okunamamıştır. Bu filmler 300 °C’de 60 dakika tavlandıktan sonra tekrar direnç ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

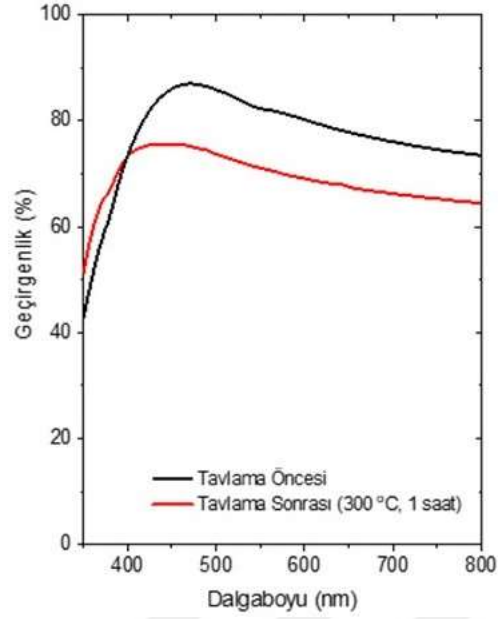


Şekil 4.2. ITO-1 örneğinin 300 °C’de 60 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

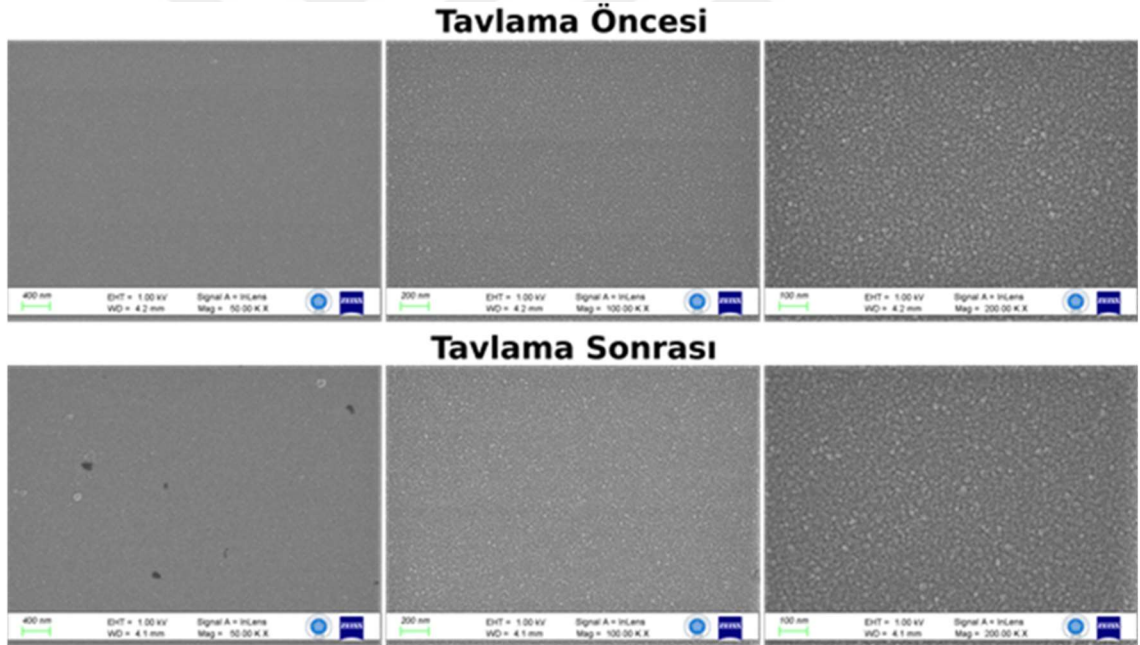
300 °C’de 60 dakika tavlama sonucu elde edilen örnekler üzerinde 1 cm’lik mesafeden ve farklı noktalardan alınan elektriksel direnç ölçümleri sonucunda sırasıyla 3,57, 3,945 ve 3.87 k Ω değerleri elde edilmiştir. Yine ITO-1 örneğinin fotoğrafları, geçirgenlik spektrumları ve FESEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. ITO-1 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.



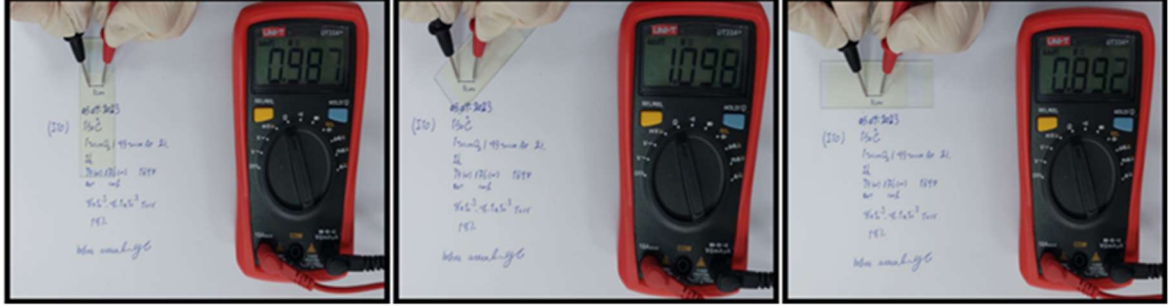
Şekil 4.4. ITO-1 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası geçirgenlik spektrumları



Şekil 4.5. ITO-1 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

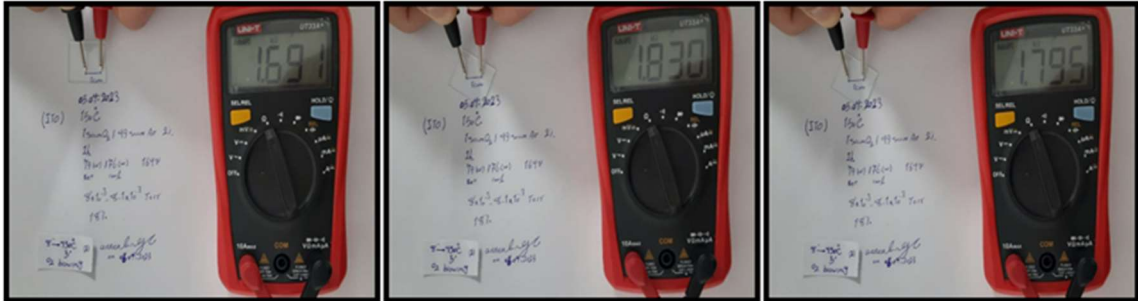
ITO-1 örneğinde tavlama sonucunda geçirgenlik bir miktar azalmıştır (Şekil 4.4). Bununla beraber FESEM görüntülerinde tavlama öncesi ve tavlama sonrası arasında anlamlı bir değişiklik gözlemlenmemiştir (Şekil 4.5). ITO-1 örneğinde hem geçirgenlik değerinin düşük oluşu hem de elektriksel direncin büyük olduğu tespit edilmiş olup daha iyi kristalizasyon için üretim esnasında alttaş sıcaklığı 150 °C'ye çıkarılarak ITO-2 ve

ITO-3 örnekleri üretilmiştir. Üretimler sonucunda oluşan örnekler 450 °C’de 60 dakika (ITO-2) ve 5 dakika (ITO-3) tavlama öncesi ve tavlama sonunda örnekler üzerinden alınan elektriksel ölçümler Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de gösterilmektedir.



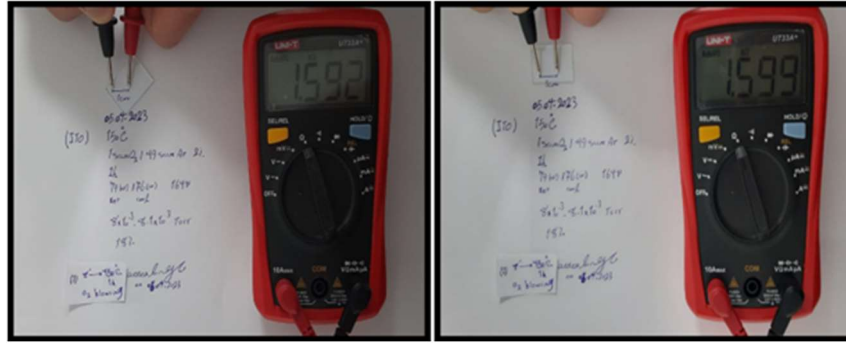
Şekil 4.6. ITO-2 ve ITO-3 örneklerinin tavlama öncesi farklı noktalardan alınan elektriksel direnç ölçümleri.

150 °C alttaş sıcaklığı ile büyütülen filmlerin tavlama öncesinde ölçülen dirençleri oda sıcaklığında büyütülen filmlere göre farklılık göstermiş ve 1 cm uzunlukta ölçülebilen direnç $\sim 1 \text{ M}\Omega$ (0,987 M Ω , 1,098 M Ω ve 0,892 M Ω) seviyelerine kadar inmiştir.



Şekil 4.7. ITO-2 örneğinin 450 °C’de 60 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Büyütülen filmler 450 °C’de 60 dakika boyunca atmosfer ortamında tavlandıktan sonra dirençlerinde ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Farklı noktalardan ölçülen dirençler 1,691, 1,830 ve 1,795 k Ω olarak ölçülmüştür. Bu 300 °C’de tavlama öncesi dirençlere göre daha az bir direnç olmasına rağmen ITO için oldukça yüksek sayılabilecek bir dirençtir.



Şekil 4.8. ITO-3 örneğinin 450 °C’de 5 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

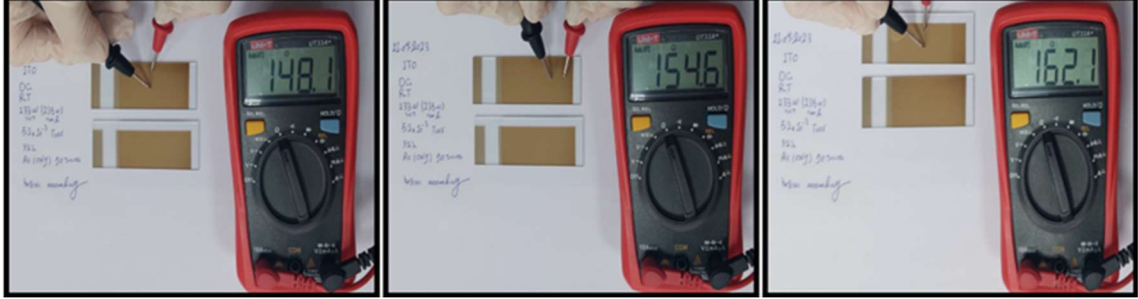
Büyütülen filmler 450 °C’de 5 dakika boyunca atmosfer ortamında tavlandıktan sonra dirençlerde mertebe olarak bir azalma gerçekleşirse de 60 dakika boyunca tavlama örneklerine göre bir miktar daha azalma meydana gelmiş ve farklı noktalardan alınan direnç ölçümleri 1,592 ve 1,599 kΩ olarak tespit edilmiştir. ITO-2 ve ITO-3 örneklerine ilişkin fotoğraflar Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Bu örnekler istenilen aralıktaki direnç sergilemediği için optik geçirgenlikleri ve FESEM görüntüleri alınmamıştır.



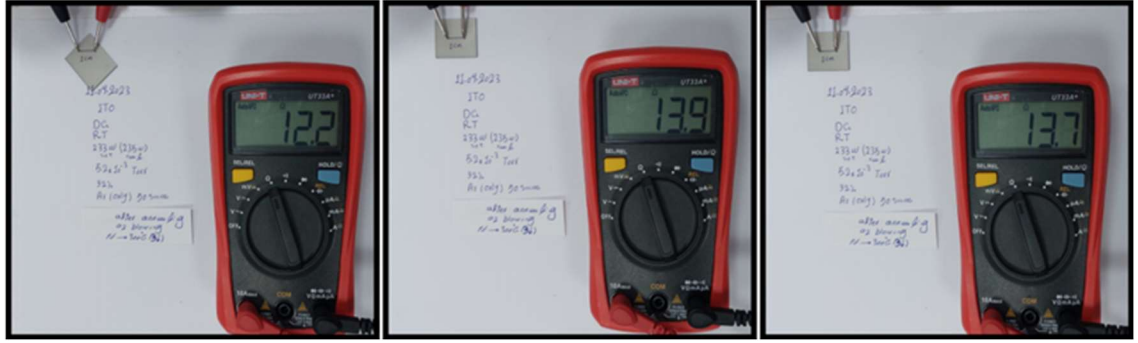
Şekil 4.9. ITO-1 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.

Düşük güç değerleri ve RF magnetron saçırma ile elde edilen filmlerin optik geçirgenlikleri istenilen değerlere yakın olsa da elektriksel dirençleri olması gereken değerlerde oldukça uzak kalmıştır. Film kalınlığını artırmak hem de RF yerine DC güç kaynağı kullanmak opsiyonu tercih edilmiştir. DC güç kaynağı iletken ve iletkeneye yakın hedef malzemeler için iyi bir seçenek olup daha stabil plazma ortamı sağlamaktadır. Bununla beraber film büyütme işleminde kalın film üretmek için 5 W/cm² gibi büyük bir güç değeri kullanılmıştır (Amalathas ve Alkai, 2016; Asri ve ark., 2020). Ayrıca büyütme esnasında ortama giren oksijenin filmin saydamlığını artırdığı ancak elektriksel direnci de paralelinde artırdığı tespit edildiğinden ortama büyütme esnasında oksijen

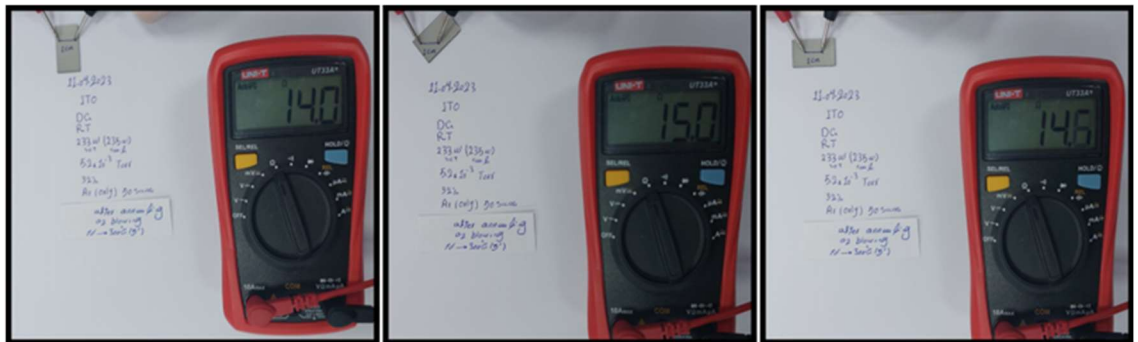
verilmemiştir. Bu şekilde elde edilen filmlere ilişkin tavlama öncesi ve 30 dakika (ITO-4) ve 5 dakika (ITO-5) 300 °C’de tavlama sonrası elde edilen elektriksel iletkenlik değerleri Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.10. ITO-4 ve ITO-5 örneklerinin tavlama öncesi farklı noktalardan alınan elektriksel direnç ölçümleri.



Şekil 4.11. ITO-4 örneğinin 300 °C’de 30 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



Şekil 4.12. ITO-5 örneğinin 300 °C’de 5 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Ortamda oksijen olmaksızın yüksek güçte büyütülen filmlerin optik geçirgenliğinin belirgin oranda düşük olmasına rağmen (Şekil 4.10) elektriksel direnci Ω mertebesine kadar düşmüştür. Üç farklı noktadan yapılan ölçümlerde 1 cm mesafede

okunan direnç değerleri 148,1, 154,6 ve 162,1 Ω olarak okunmuştur. Büyütölen filmler 300 $^{\circ}\text{C}$ 'de sırasıyla 30 dakika tavlandıktan sonra (ITO-4) (Şekil 4.11) ve 5 dakika tavlandıktan sonra (ITO-5) (Şekil 4.12) direnç değerleri oldukça azalmıştır. 300 $^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika tavlama sonucunda elde edilen dirençler 12,2, 13,9 ve 13,7 Ω olarak okunmuştur. 300 $^{\circ}\text{C}$ 'de 5 dakika tavlama sonucunda elde edilen dirençler 14,0, 15,0 ve 14,6 Ω olarak okunmuştur. Sürenin azalmasına bağlı olarak direnç değerinde çok küçük bir artış gözlemlenmiştir. Direnç değerleri istenilen seviyeye gelmesine rağmen optik geçirgenlikleri belirgin oranda düşük kalmıştır. Bu üretimden elde edilen filmlerin optik geçirgenliğini artırabilmek adına daha 450 $^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika (ITO-6) ve 5 dakika (ITO-7) tavlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu filmlere ilişkin FPP hazır script kullanılarak elde edilen ölçümler Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir.

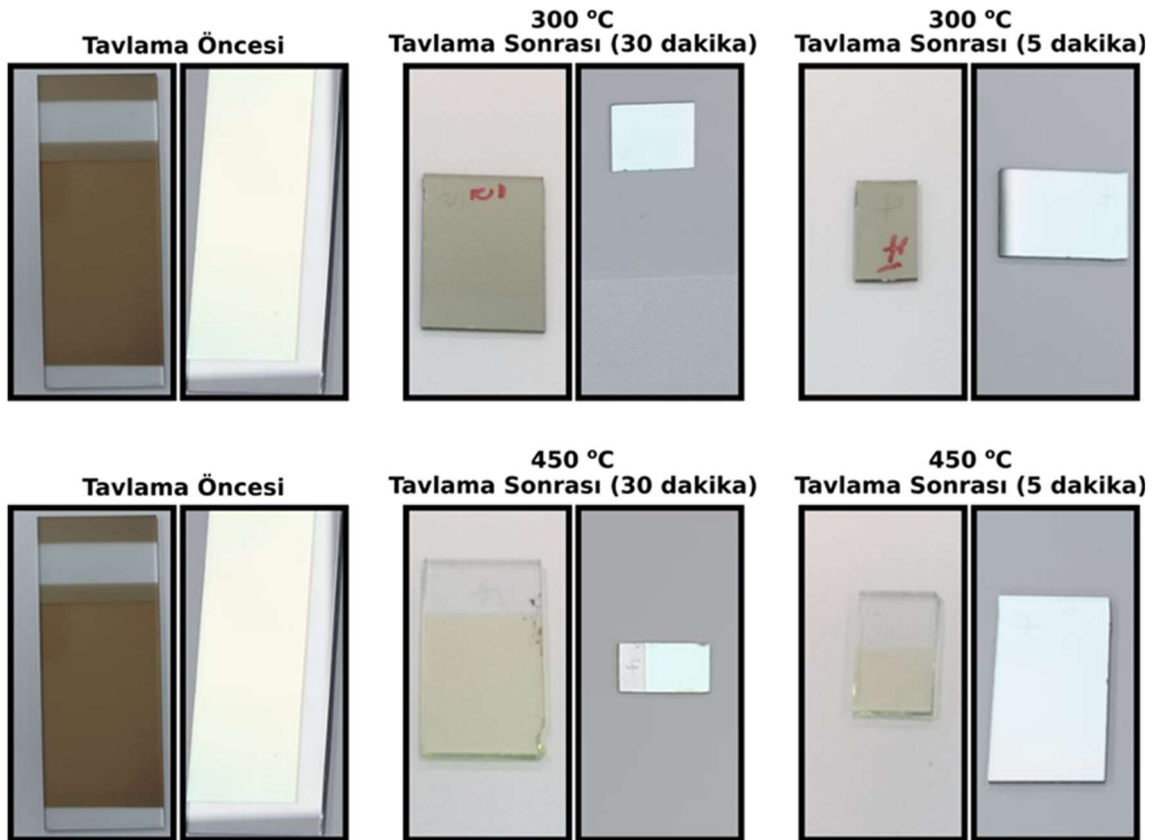


Şekil 4.13. ITO-6 örneğinin 450 $^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika tavllanması sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

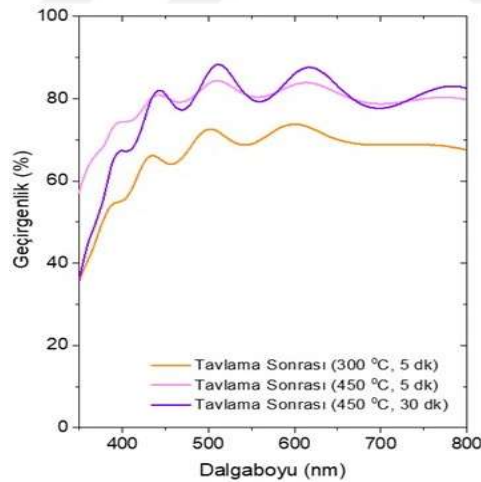


Şekil 4.14. ITO-7 örneğinin 450 $^{\circ}\text{C}$ 'de 5 dakika tavllanması sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

450 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta farklı zamanlarda tavllanmış örneklerin 4-nokta prob yöntemiyle okunan direnç ve öz direnç değerleri Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir. Okunan direnç değerleri 1 mm aralıklı iki pogo pin arasından elde edilmiş olup bunun 10 katı değer 1 cm mesafede okunan direnç değeri olarak kabul edilebilir. Bu bağlamda 30 dakika 450 $^{\circ}\text{C}$ 'de tavllanmış ITO-6 örneğinde 1 cm'de okunan direnç $\sim 30 \Omega$ iken 5 dakika 450 $^{\circ}\text{C}$ 'de tavllanmış ITO-7 örneğinde 1 cm'de okunan direnç $\sim 39,5 \Omega$ olmuştur. Tavlama sıcaklığı artışı ile direnç değeri artış göstermiştir. Hem tavlama öncesi hem de tavlama sonrası elde edilen örneklerin fotoğrafları ve optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.15 ve 4.16'da gösterilmektedir.



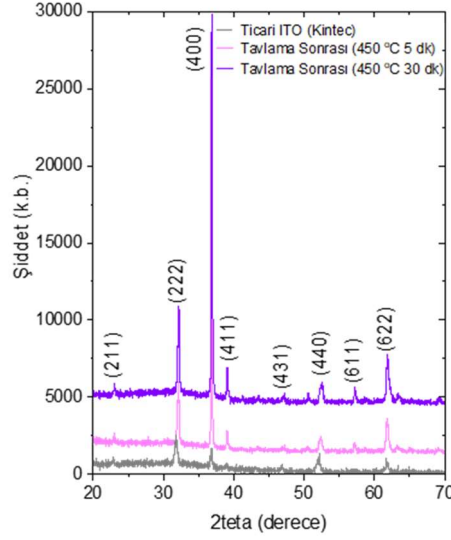
Şekil 4.15. ITO-4, ITO-5, ITO-6 ve ITO-7 örneklerinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.



Şekil 4.16. ITO-5, ITO-6 ve ITO-7 örneklerinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası geçirgenlik spektrumları.

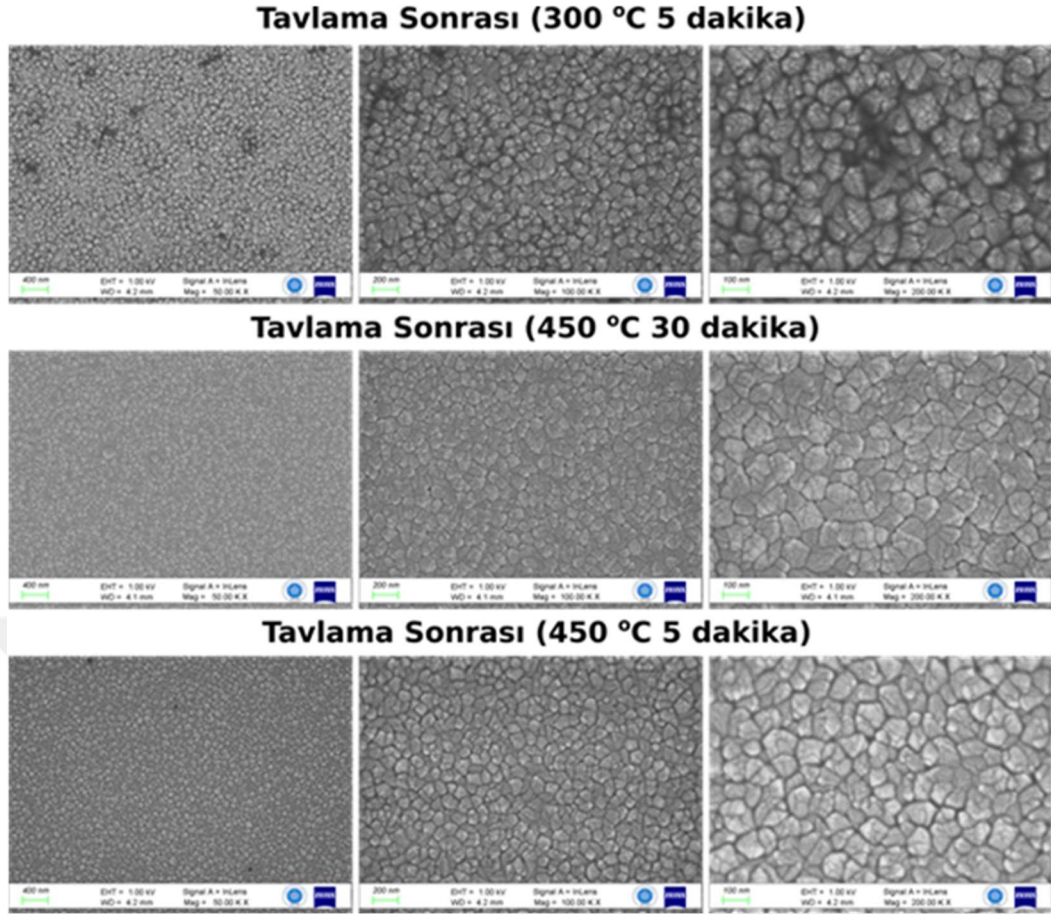
Şekil 4.16'dan da görüldüğü üzere 450 °C'de yapılan tavlama işlemi optik geçirgenliği artırmaktadır. Ancak elektriksel iletkenlik değerinde de azalma meydana getirmektedir. Ayrıca optik geçirgenlik girişim desenlerine bakarak en kalın filmin 450 °C'de 30 dakika tavlama sonucu oluşan filme ait olduğu kabaca söylenebilir. Büyütülen

filmlerin yapısal incelemesi için XRD kullanılmıştır. ITO-6 ve ITO-7 örneklerinin ticari ITO ile karşılaştırıldığı XRD grafiği Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.17. ITO-6 ve ITO-7 örneklerinin ticari ITO örneği ile karşılaştırıldığı XRD spektrumu.

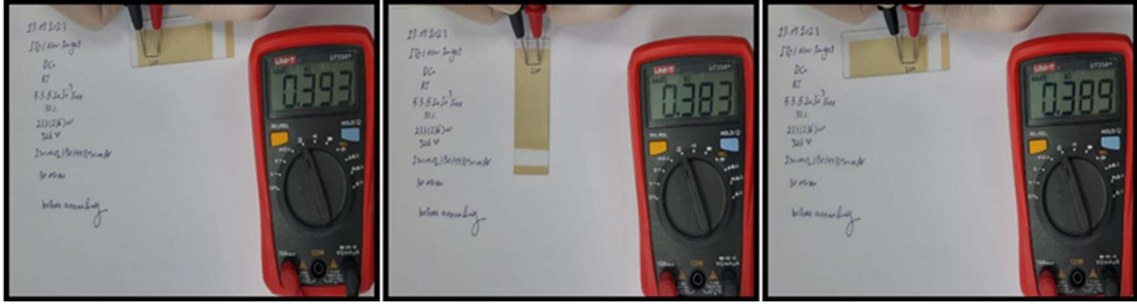
Şekil 4.17’de ticari ITO örneğine ait pikler ve elde edilen pikler karşılaştırıldığında ticari ITO spektrumunda olmayan (411) ve (611) pikleri büyütülen örneklerde gözlemlenmiştir. Bu pikler de yine ITO’ya ait olup farklı fazların varlığını göstermektedir (Campos ve ark., 2017). Ayrıca üretilen örneklerde (400) pikinin baskın olması üretim yöntemi olarak magnetron saçırma yöntemi seçiminden kaynaklanmaktadır (Kutlu ve Oturak, 2018). ITO-5, ITO-6 ve ITO-7 örneklerine ilişkin FESEM görüntüleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



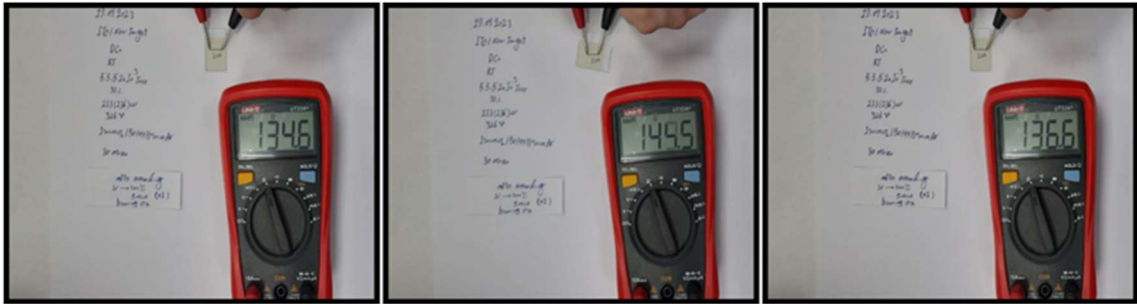
Şekil 4.18. ITO-5, ITO-6 ve ITO-7 örneklerinin 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

Şekil 4.18'deki FESEM görüntülerinde görüldüğü üzere 300 °C'de gözlemlenen aralarında boşluklar bulunan taneciklerin sıcaklık artışı ile birlikte birbirlerine temas ettiği ve sıkı bir yığılma gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak bu sıkı yığılma dirençte bir miktar artışa da sebep olmaktadır.

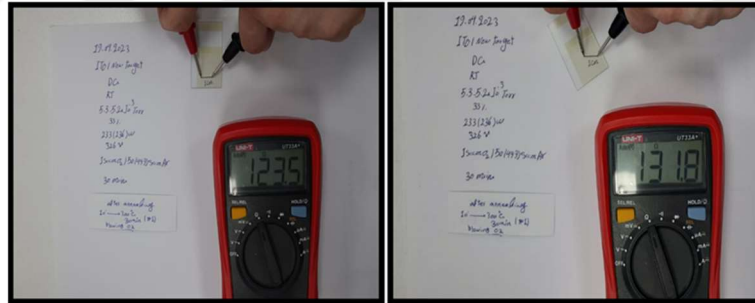
Elde edilen filmlerde istenilen elektriksel dirence rağmen (ITO-4 ve ITO-5) optik geçirgenliğin yeterli olmadığı tespit edilmiş ve büyütme şartları sabit tutularak filmleri büyütme esnasında ortama 1 sccm oranında oksijen verilmiştir. Daha sonra filmler sırasıyla 300 °C'de 30 dakika (ITO-8) ve 5 dakika (ITO-9) tavlannmıştır. 450 °C'de tavlama işleminde direnç artışı gerçekleştiğinden dolayı bu sıcaklık değerinde tavlama yapılmamıştır. Elde edilen filmlerin tavlama öncesi ve tavlama sonrası okunan dirençleri Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de gösterilmektedir.



Şekil 4.19. ITO-8 ve ITO-9 örneklerinin tavlama öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



Şekil 4.20. ITO-8 örneğinin 300 °C’de 30 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



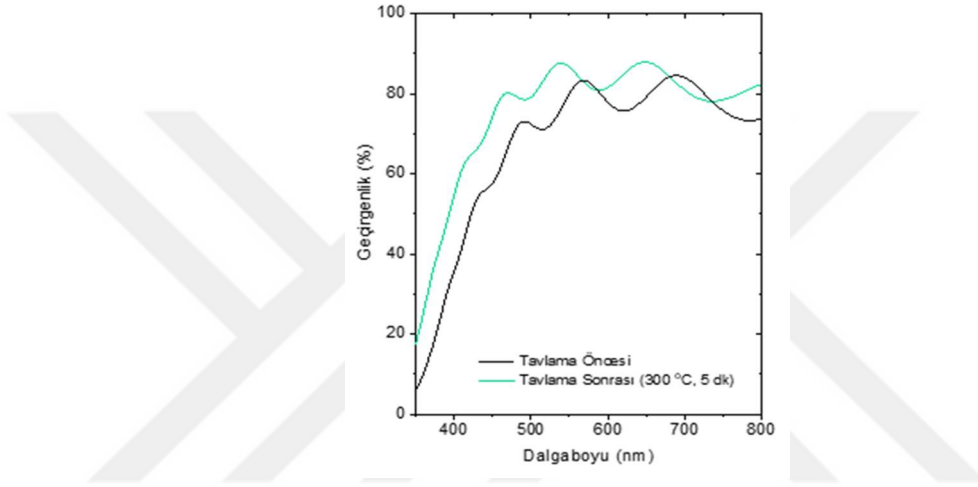
Şekil 4.21. ITO-9 örneğinin 300 °C’de 5 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Şekil 4.19-4.21 incelendiğinde üretim esnasında ortama giren çok az bir oksijen elektriksel dirençte büyük bir artışa neden olmuştur. Tavlama öncesi $\sim 390 \Omega$ olarak okunan direnç tavlama sonunda 123,5 ile 145,5 Ω arasında değerler almıştır.

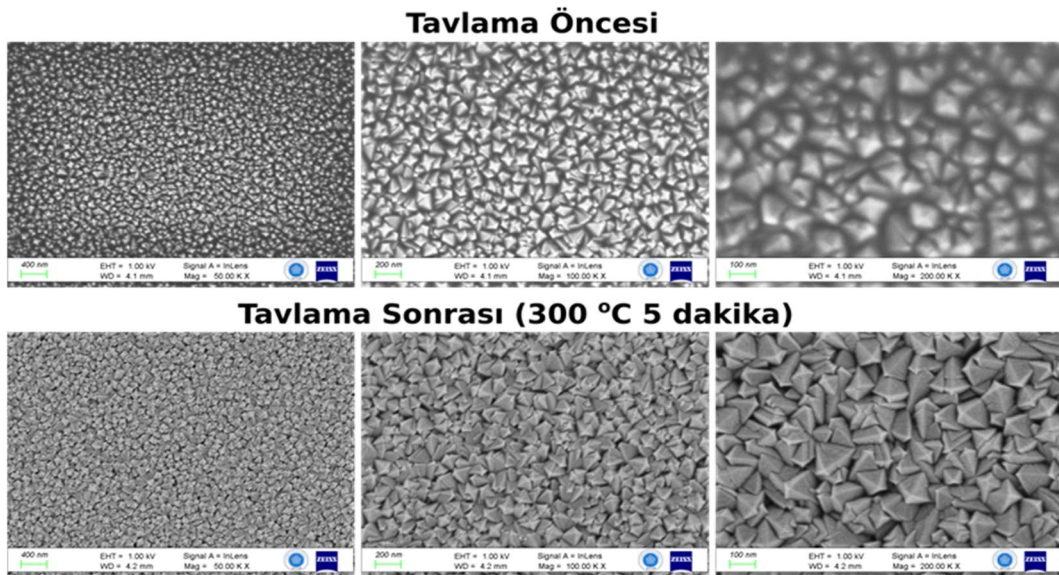
Bu değerler istenilen değerlerden oldukça uzak olup büyütme esnasında ortama giren oksijen elektriksel direncin büyümesine neden olmaktadır. Üretilen ITO-8 ve ITO-9 örneklerine ilişkin fotoğraflar, optik geçirgenlik spektrumları ve FESEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24’te gösterilmektedir.



Şekil 4.22. ITO-8 ve ITO-9 örneklerinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.



Şekil 4.23. ITO-9 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası geçirgenlik spektrumları.

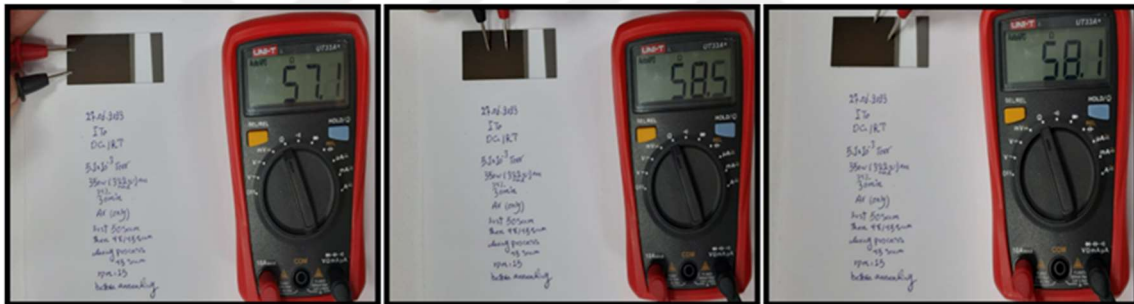


Şekil 4.24. ITO-9 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

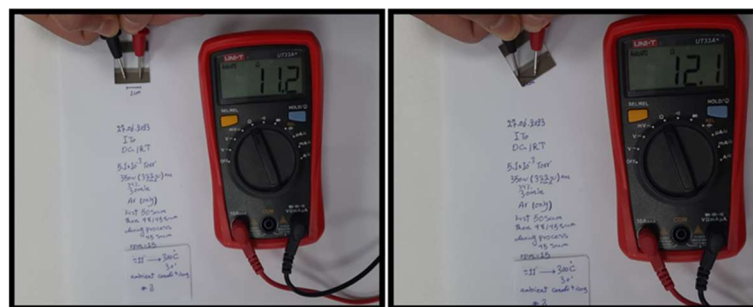
Şekil 4.23 incelendiğinde optik geçirgenliğin tavllanmış örnekte daha yüksek olduğunu bunula beraber ~ 450 nm ve altı düşük dalga boylarında geçirgenliğin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.24'te tavllanmış ve tavlannmamış örneklerdeki bağımsız tanecikler FESEM görüntülerinde görülmektedir.

Saçtırma gücündeki artışla beraber elektriksel iletkenlikte iyileşmenin sağlanması üzerine güç sistemin izin verdiği en üst limit olan DC 350 W'a ayarlanmış ve bu güç değerinde oksijensiz ortamda üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen örnekler sistemden çıkarıldığında neredeyse opaktır.

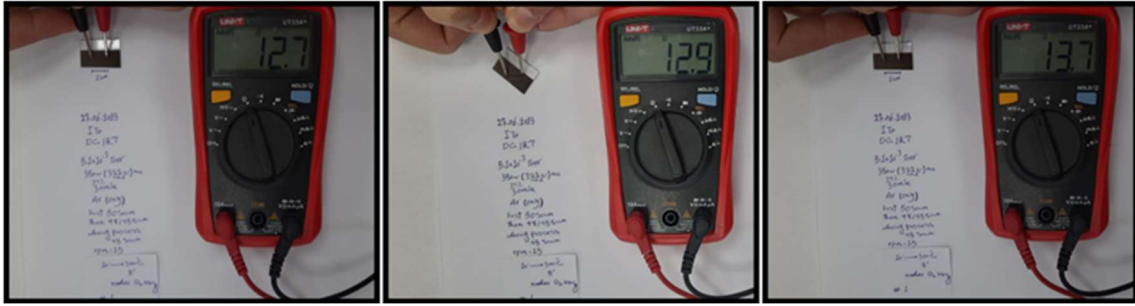
Bu örnekler sırasıyla 300 °C'de 30 dakika (ITO-10) ve 5 dakika (ITO-11) tavlannmıştır. Yine bu üretimden elde bir başka örnek seti de 450 °C'de sırasıyla 30 dakika (ITO-12) ve 5 dakika (ITO-13) tavlannmıştır. Tavlama öncesi ve tavlama sonrası örneklere ilişkin elektriksel direnç ölçümleri Şekil 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da gösterilmektedir.



Şekil 4.25. ITO-10, ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin tavlannması öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri



Şekil 4.26. ITO-10 örneğinin 300 °C'de 30 dakika tavlannması sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



Şekil 4.27. ITO-11 örneğinin 300 °C’de 5 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



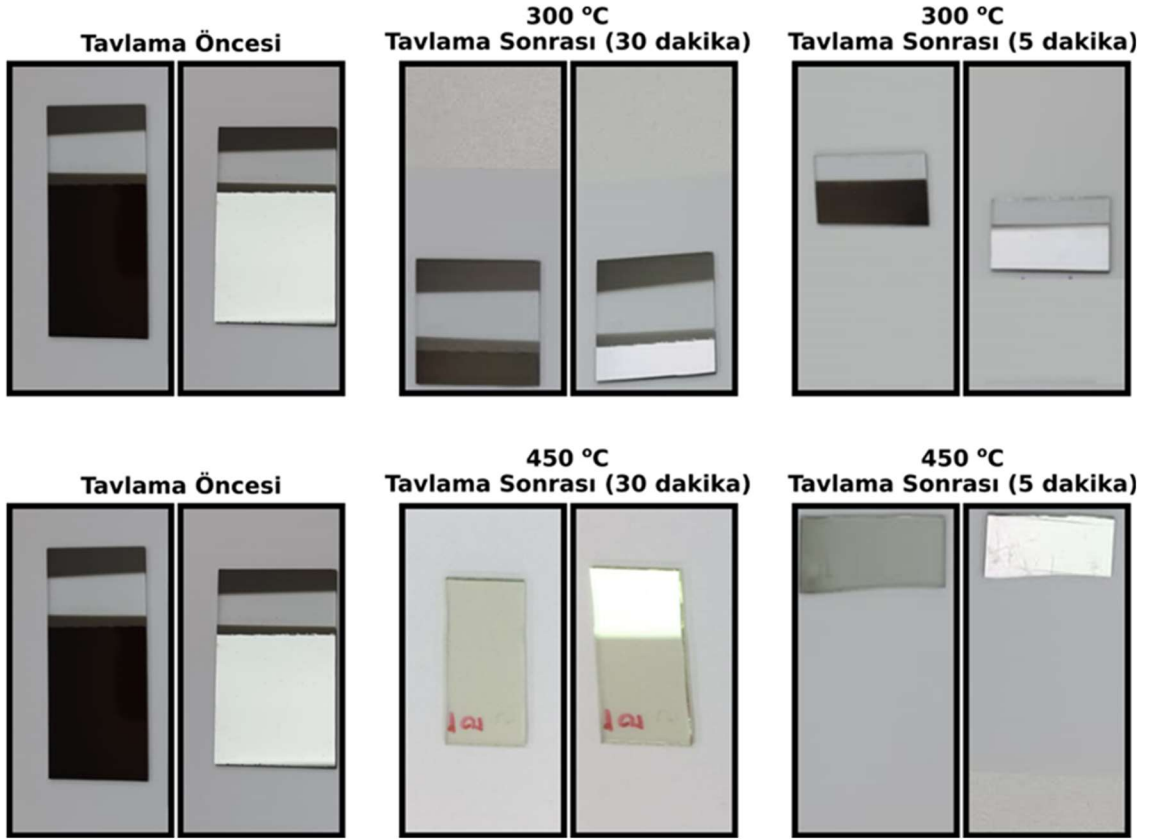
Şekil 4.28. ITO-12 örneğinin 450 °C’de 30 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



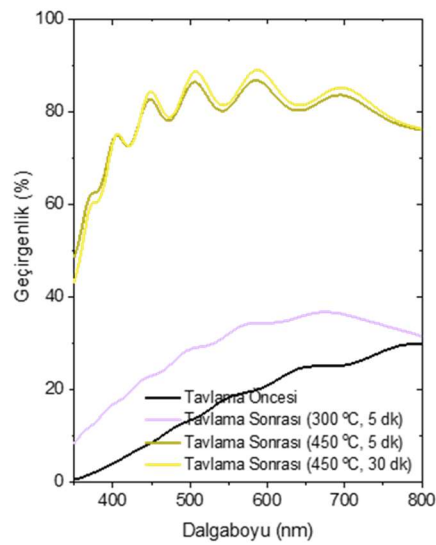
Şekil 4.29. ITO-13 örneğinin 450 °C’de 5 dakika tavlama sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Yapılan elektriksel ölçümler sonucunda tavlama öncesi ITO filmlerin 1 cm aralıkta okunan elektriksel dirençleri 57,1, 58,5 ve 58,1 Ω olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.25). Bu filmler neredeyse opak olarak gözlemlenmiştir. Daha sonra 300 °C’de 30 dakika (ITO-10) tavlandığında elektriksel direnç azalarak 1 cm mesafede 11,2 ve 12,1 Ω değerlerini göstermiştir (Şekil 4.26). 300 °C sıcaklık sabit tutularak tavlama süresi 5 dakikaya indirildiğinde (ITO-11) elektriksel direnç çok az bir artış ile 12,7, 12,9 ve 13,7 Ω değerlerini göstermiştir (Şekil 4.27). Ancak 300 °C sıcaklık filmlerin saydamlığını yeterince artırmamıştır. Bundan dolayı filmler daha yüksek sıcaklıkta (450 °C) tavlammıştır. 450 °C’de 30 dakika tavlanan (ITO-12) örneğinin ve 5 dakika tavlanan (ITO-13) örneğinin FPP ile alınan elektriksel ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da gösterilmektedir. ITO-12 örneğine bakıldığında 1 cm’de yaklaşık ~ 20 Ω direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Daha kısa süre tavlanan ITO-13 örneğinde ise ~ 11 Ω direnç okunmuştur. ITO-13 örneğinin elektriksel olarak oldukça iyi bir üretim olduğu

söylenbilir. ITO-10, ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerine ilişkin fotoğraflar optik geçirgenlik spektrumu Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterilmektedir.

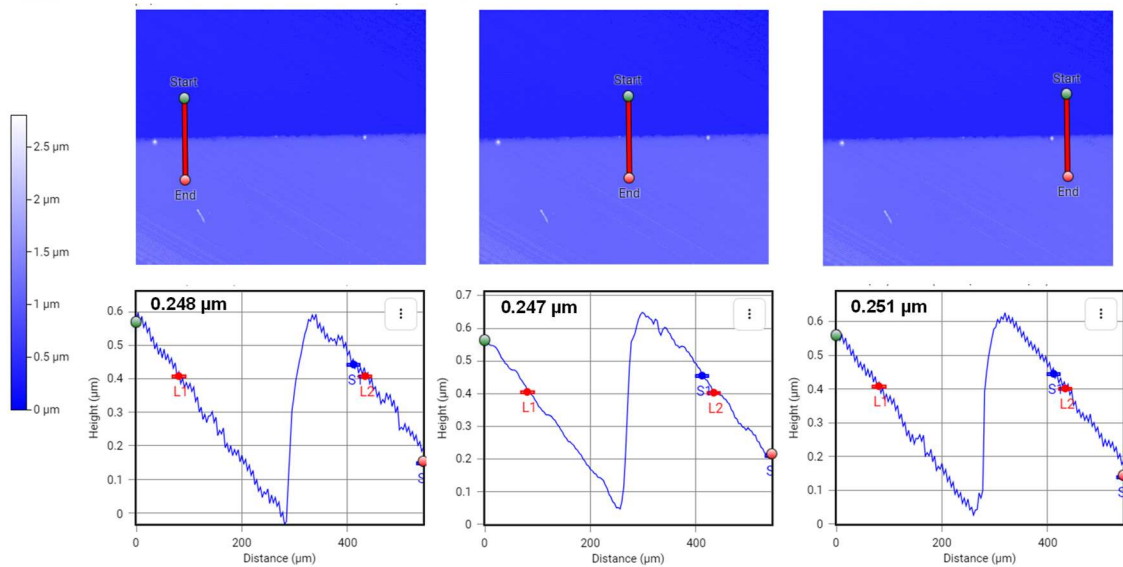


Şekil 4.30. ITO-10, ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.



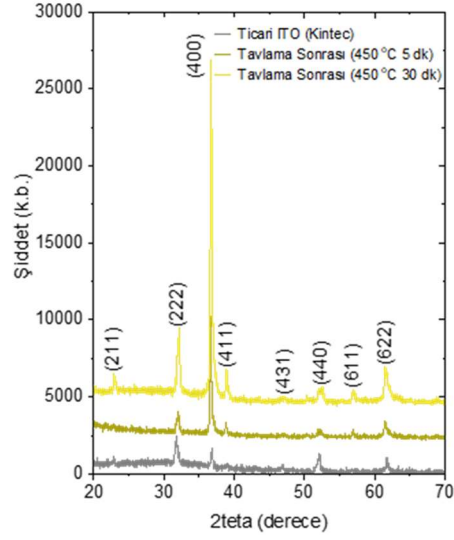
Şekil 4.31. ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası geçirgenlik spektrumları.

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere, 300 °C tavlama sıcaklığının üretilen filmlerin optik özelliklerini iyileştirmek için yeterli bir tavlama sıcaklığı olmadığı tespit edilmiştir. 450 °C’de tavlanan filmlerin optik geçirgenlikleri ise hem 5 dk hem de 30 dk tavlama işleminden sonra ~450 nm ve üzerinde ~%80 civarındadır. Ancak, her iki tavlama süresinde de 300-450 nm dalga boyu aralığında %50 seviyesine kadar düşmektedir. Geçirgenlik spektrumlarındaki girişim saçakları dikkate alındığında üretilen filmlerin göreceli olarak kalın olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.32’de verilen optik profilometre görüntüsü incelendiğinde ITO-13 kodlu filmin ~250 nm kalınlığa sahip olduğu görülmektedir. Bu değer ticari olarak kullanılan ITO altaşlara (150-200 nm aralığında) nazaran daha yüksek bir değerdir.

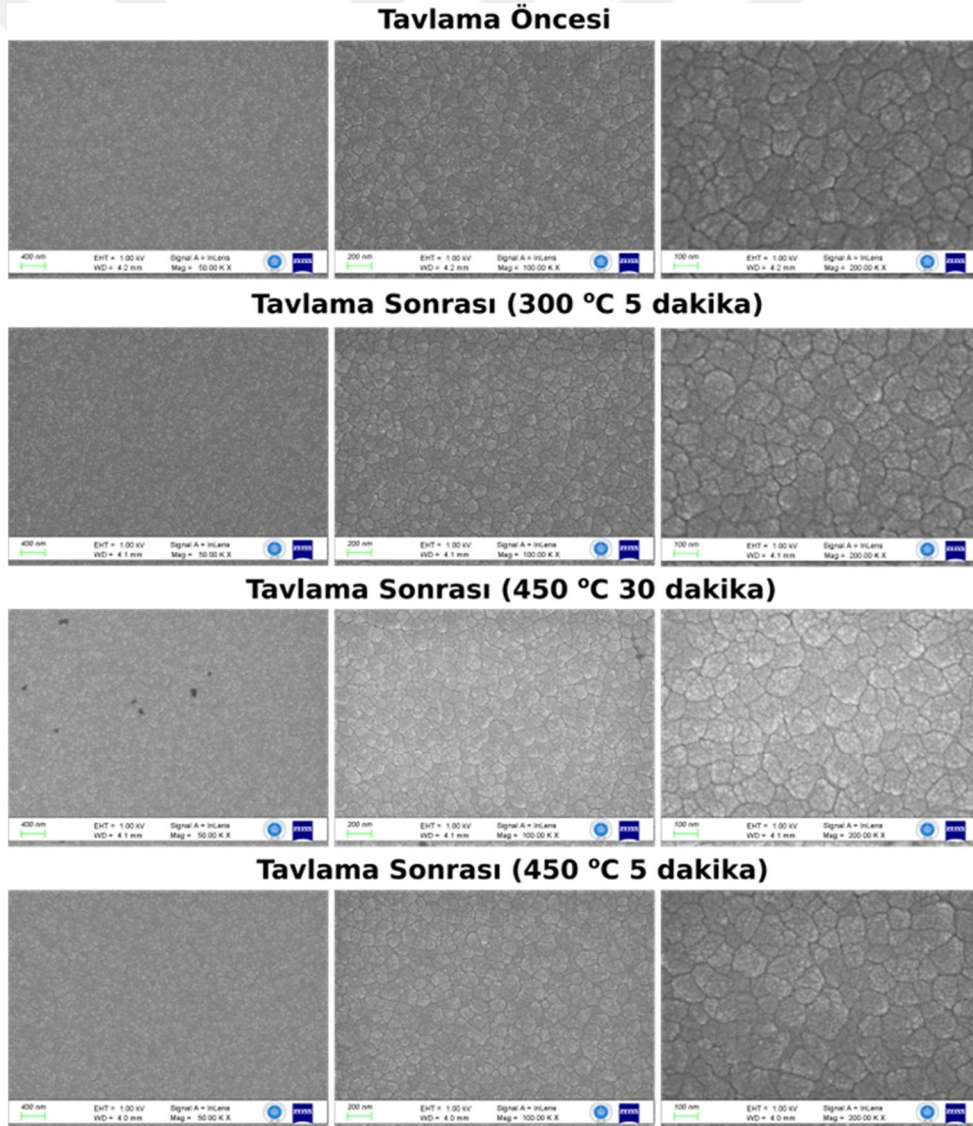


Şekil 4.32. ITO-13 filmine ait farklı noktalardan alınan profilometre görüntüleri ve kalınlık spektrumları.

Elde edilen filmlerin yapısal özelliklerinin ticari ITO ile karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.33’te ve ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin tavlama öncesi ve sonrası morfolojik yapılarının karşılaştırıldığı FESEM görüntüleri Şekil 4.34’te gösterilmektedir.



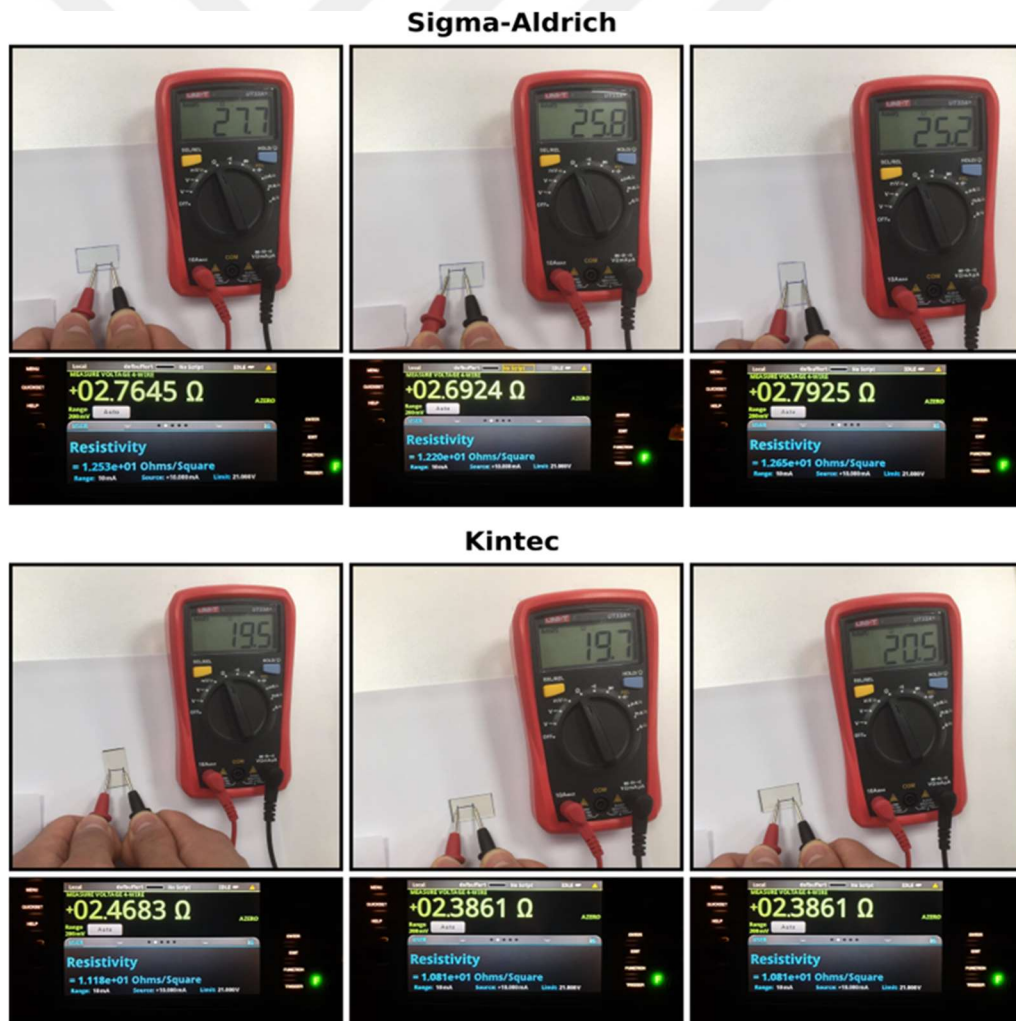
Şekil 4.33. ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin ticari ITO örneği ile karşılaştırıldığı XRD spektrumu.



Şekil 4.34. ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

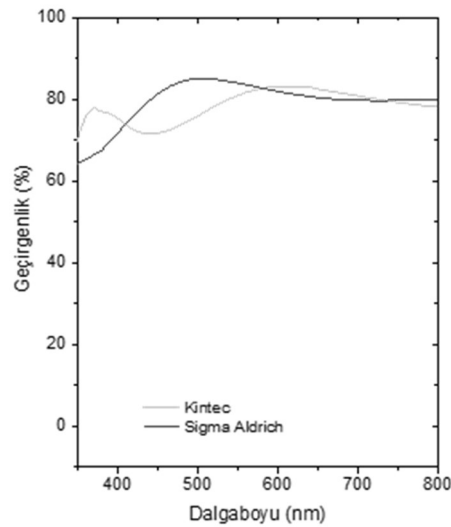
Şekil 4.33'te ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin ticari ITO örneğine ait XRD pikleri karşılaştırılması sunulmuştur. Daha önce ITO-6 ve ITO-7 örneklerinde olduğu gibi ticari ITO spektrumunda olmayan (411) ve (611) pikleri büyütülen örneklerde gözlemlenmiştir. Ayrıca baskın pikin de (400) piki olması üretilen filmlerin ITO'ya ait olup ticari pikler de yine ITO'ya ait olup farklı fazların varlığını göstermektedir. Bu örneklerde de (400) piki baskın olup bu yönelimin üretme yöntemine ve üretim şartlarına bağlı olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.34'te ITO-11, ITO-12 ve ITO-13 örneklerine ilişkin FESEM görüntüleri incelendiğinde tavlama öncesi ve tavlama sonrası morfolojik yapıda anlamlı bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

Büyütülen filmlerin karşılaştırılmasında kullanılmak üzere Sigma-Aldrich ve Kintec firmalarından elde edilen Ticari ITO örneklerinin de karakterizasyonları yapılmıştır. Elektriksel, optik ve morfolojik karakterizasyonlar Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37'de gösterilmektedir.



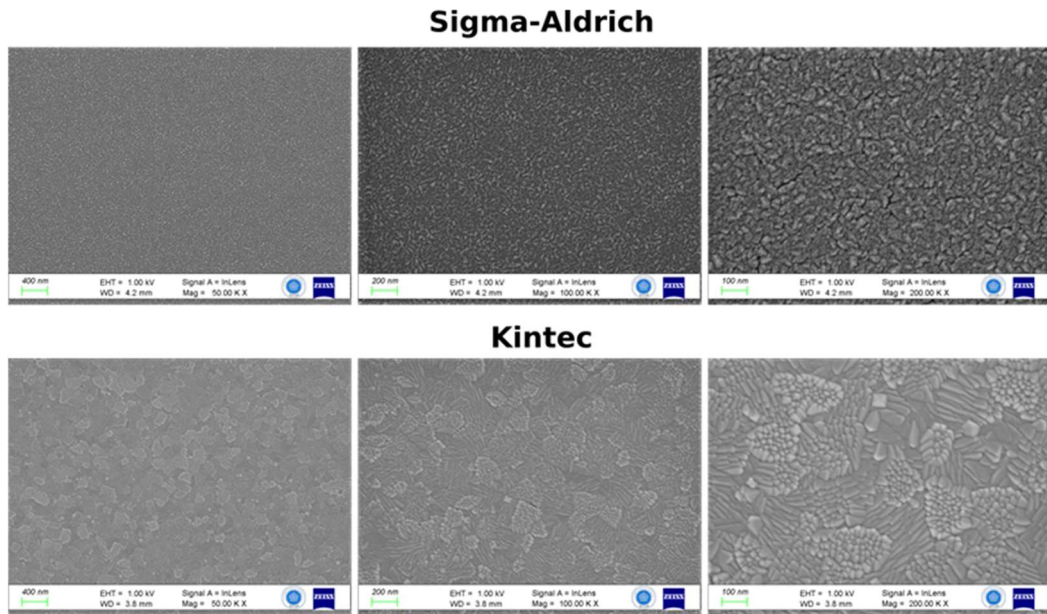
Şekil 4.35. Sigma-Aldrich ve Kintec firmalarına ait ticari ITO örneklerinin farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Şekil 4.35'te okunan elektriksel dirençler, üretilen filmlerin elektriksel dirençleri karşılaştırıldığında 233 W gücünde büyütülen filmlerin 300 °C'de 30 ve 5 dakika tavlama ile elde edilen ITO-4 ve ITO-5 ile 350 W gücünde büyütülen filmlerin 450 °C'de 30 ve 5 dakika tavlama ile elde edilen ITO-12 ve ITO-13 örneklerinden elde edilen elektriksel dirençlerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Yani magnetron saçırma yöntemi ile büyütülen ITO filmlerde daha düşük direnç değerlerine ulaşılabilmiştir. Ticari ITO filmlerin optik geçirgenlikleri Şekil 4.36'da sunulmuştur.



Şekil 4.36. Ticari ITO filmlerin optik geçirgenlikleri.

Şekil 4.36 incelendiğinde 300-450 nm dalga boyu arasında %60 ve üzeri; >450 nm dalga boylarında %80 civarında optik geçirgenlik elde edilmiştir. Bu değerler üretilen filmlerin optik geçirgenlikleri ile karşılaştırıldığında ITO-4 ve ITO-5 örneklerinin optik geçirgenliklerin belirgin şekilde düşük kaldığı ancak ITO-12 ve ITO-13 örneklerinin optik geçirgenliklerinin ticari ITO seviyelerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç Şekil 4.32b'de verilen kalınlık ölçüm sonucunu destekler niteliktedir.



Şekil 4.37. Ticari ITO filmlerin 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

Ticari ITO filmlerin morfolojik özellikleri Şekil 4.37’de sunulmuştur. Şekil 4.37 incelendiğinde Sigma-Aldrich firmasından alınan ITO filmin yüzeyinde yoğun küçük taneciklerin varlığı göze çarpmaktadır. Bununla birlikte Kintec firmasından alınan ITO filmin yüzeyinde taneciklerden daha ziyade domainler olduğu gözlemlenmiştir. Bu yapısal farklılıkların üretim yöntemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

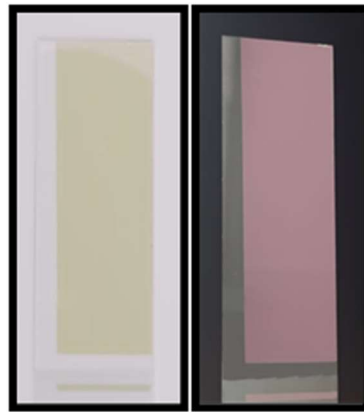
4.2. FTO Elektrot Üretim ve Karakterizasyon Çalışmaları

FTO çalışmalarında FTO hedef RF güç kaynağına bağlı magnetron üzerine yerleştirilmiş ve Çizelge 4.1’te gösterilen parametrelerle üretimler gerçekleştirilmiştir. Örneklerin isimlendirilmeleri de yine Çizelge 4.1’te sunulmuştur. FTO üretimlerinde ilk olarak 3 W/cm^2 güç ile büyütme işlemi yapılmıştır. Kristalizasyon için $150 \text{ }^\circ\text{C}$ altta sıcaklığı uygun görülmüştür. Depozisyon basıncı $\sim 5 \times 10^{-3}$ Torr seviyelerinde tutulmaya çalışılmıştır. FTO-1 örneğine ilişkin fotoğraf Şekil 4.38’de gösterilmektedir.



Şekil 4.38. FTO-1 örneğinin tavlama öncesi fotoğrafları.

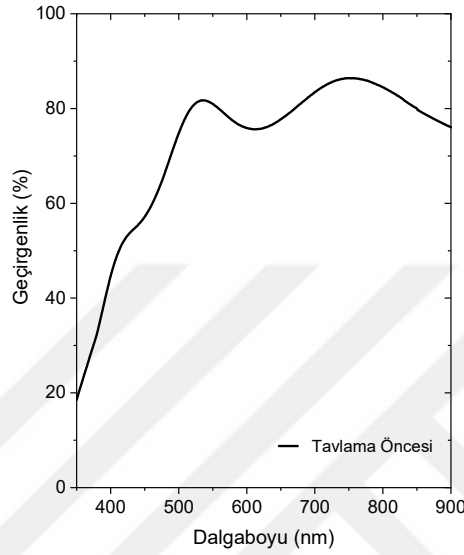
Şekil 4.38’de gösterilen FTO-1 örneğinde FTO film lam alttaş üzerine büyütülmüş ve filmlere ait 1 cm mesafeden 2-nokta ile gerçekleştirilen direnç ölçümünde yaklaşık 20 M Ω seviyesinde direnç değerleri okunmuştur. Ayrıca üretim esnasında yaklaşık 20 dakika sonunda plazmanın stabilitesi bozulmuş ve plazma aniden giderek üretim sonlanmıştır. Ancak bu film de değerlendirmeye dahil edilmiştir. Daha önce yapılan ön çalışmalar sonucunda M Ω seviyelerdeki direnç seviyesinin üretim sonucu yapılan işlemlerle Ω seviyesine inemediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı ilgili filmler için farklı bir karakterizasyon işlemine gerek duyulmamıştır. Direnç değerinin çok yüksek olması sebebiyle ısıtım işlemi de gerçekleştirilmemiştir. Aynı şartlarda 60 dakikalık üretim sonucu elde edilen filmler (FTO-2) Şekil 4.39’da gösterilmektedir.



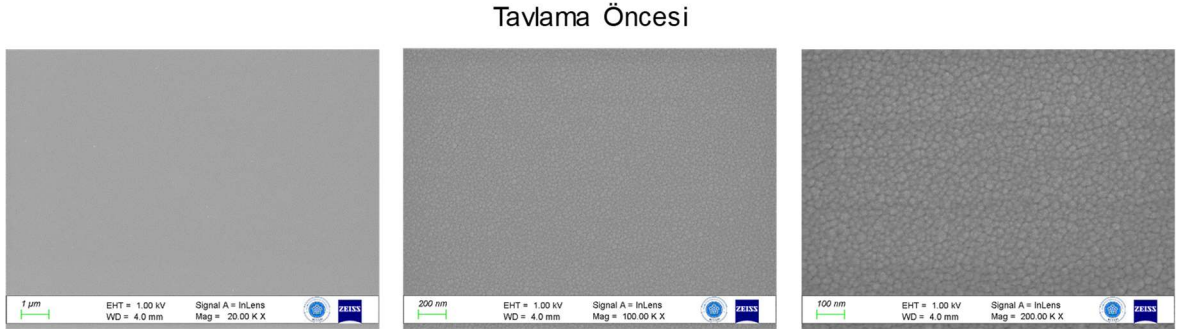
Şekil 4.39. FTO-2 örneğinin tavlama öncesi fotoğrafları.

FTO-2 örneğinde büyütme süresinin 20 dakikadan 60 dakikaya çıkarılmasıyla ile üretilen FTO filmlere ait görseller Şekil 4.39’da sunulmuştur. Lam alttaş üzerine

büyütülen filmlere ait 1 cm mesafeden 2-nokta direnç ölçümü yaklaşık 100 M Ω mertebesinde bir direnç değeri verdiğiinden ve optik geçirgenliğin belirgin şekilde düşük olması sebebiyle büyütme sonunda herhangi bir ısıl işlem ve karakterizasyon gerçekleştirilmemiştir. Büyütülen filmin optik geçirgenliği ve FESEM görüntüleri Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de gösterilmektedir.



Şekil 4.40. FTO-2 örneğinin optik geçirgenlik spektrumu.



Şekil 4.41. FTO-2 örneğinin 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

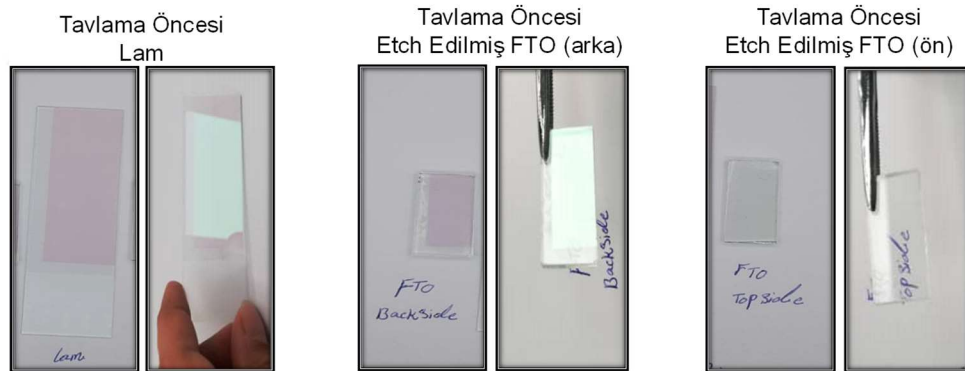
Şekil 4.40’dan de görüldüğü üzere üretilen filmin ~550 nm altında optik geçirgenliği düşük çıkmıştır. Şekil 4.41’den homojen tanecik dağılımına sahip bir yüzeyin olduğu görülmektedir.

Yüksek direncin nedeninin lam alttaş olup olmadığını tespit etmek amacıyla lam (FTO-3, FTO-4) ile birlikte tüm yüzeyi aşındırılmış ticari FTO alttaşlar (FTO-5) üzerine büyütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda sistem içerisine 3 sccm oksijen

akışı da sağlanırken aşındırılmış FTO alttaşın ön ve arka yüzeylerine eş-zamanlı olarak büyütülmüştür. Oksijen parametresinin değiştirilmesi ile üretilen FTO filmlere ait görseller Şekil 4.42’de gösterilmektedir. İlgili filmlere ait tavlama öncesi ve tavlama sonrası (450 °C sıcaklıkta 5 dakika, 20 dakika ve 60 dakika süre ile) direnç değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Elde edilen veriler ışığında tavlama işleminin direnç değerlerini M Ω mertebesinde k Ω mertebesine düşürdüğü görülürken tavlama süresinin düzenli değişime neden olmadığı söylenebilir. Aynı zamanda kullanılan alttaşın da belirgin bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmış ancak bu bulgunun sonraki denemelerde de desteklenmesi amacıyla bir süre daha farklı alttaş denemelerine devam edilmesine karar verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı sürelerde tavllanmış lam ve FTO alttaş örneklerin direnç değerleri.

Malzeme	Tavlama öncesi direnç (Ω)	5 dakika tavlama sonu direnç (Ω)	20 dakika tavlama sonu direnç (Ω)	60 dakika tavlama sonu direnç (Ω)
FTO-3	Aralık dışı	8 K	4-5 K	3
FTO-5-Üst	10 M	2,5-3 K	3 K	28-29 K
FTO-5-Alt	Aralık dışı	5-6 K	5 K	3,4-4 K

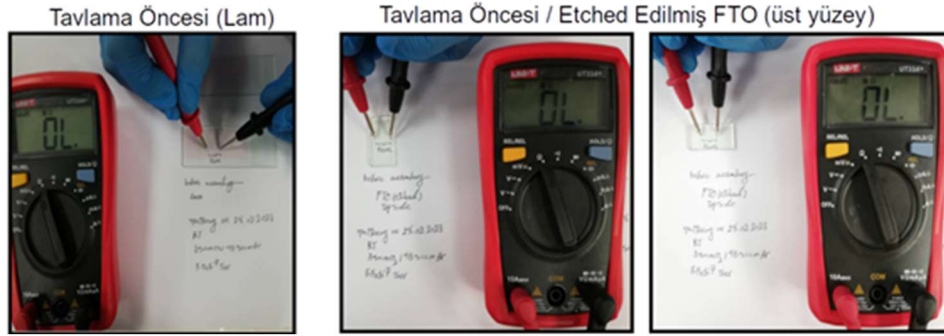


Şekil 4.42. FTO-3 ile FTO-5 örneğinin üst ve alt yüzeylerinin tavlama öncesi fotoğrafları.

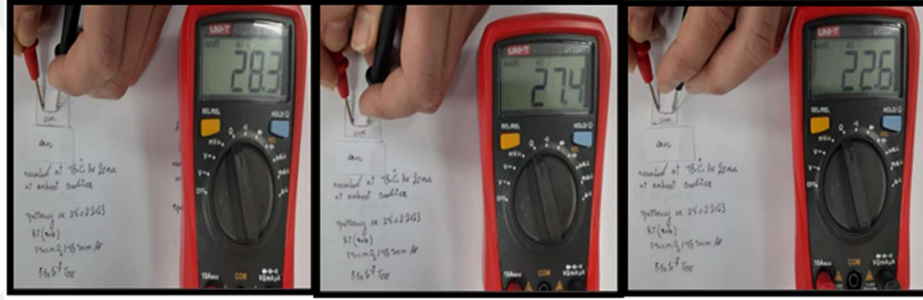
Sonuç olarak elde edilen direnç değerlerinin yüksek ve optik geçirgenliğin ise belirgin şekilde düşük olması sebebiyle ilgili filmler için farklı bir karakterizasyon işlemlerine gerek duyulmamıştır. Ancak, bundan sonraki FTO büyütme proseslerinden sonra tavlama işleminin 20 dakika olarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

FTO çalışmalarında büyütme esnasında 150 °C olarak belirlenen alttaş sıcaklığının etkisinin olup olmadığını anlamak amacıyla oda sıcaklığında hem lam hem de aşındırılmış FTO üzerinde büyütme yapılmıştır. Elde edilen lam örnekler (FTO-6) ve aşındırılmış FTO örnekler (FTO-7) 450 °C sıcaklıkta 20 dakika boyunca tavlannmıştır.

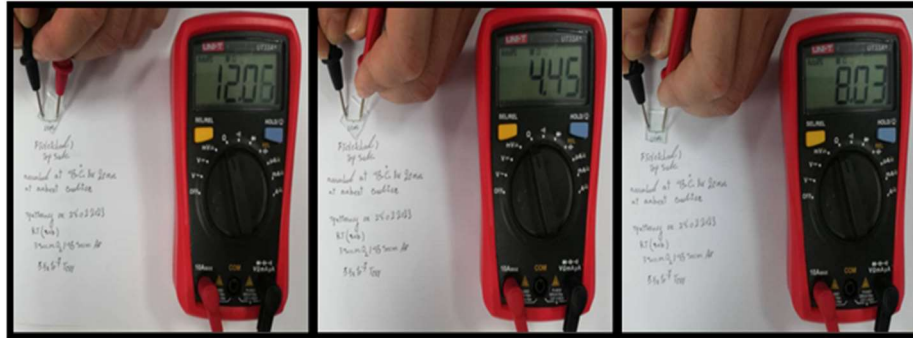
Elde edilen örneklerin tavlama öncesi ve tavlama sonrası elektriksel dirençleri Şekil 4.43-45'te gösterilmektedir.



Şekil 4.43. FTO-6 ve FTO-7 örneklerinin tavlama öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



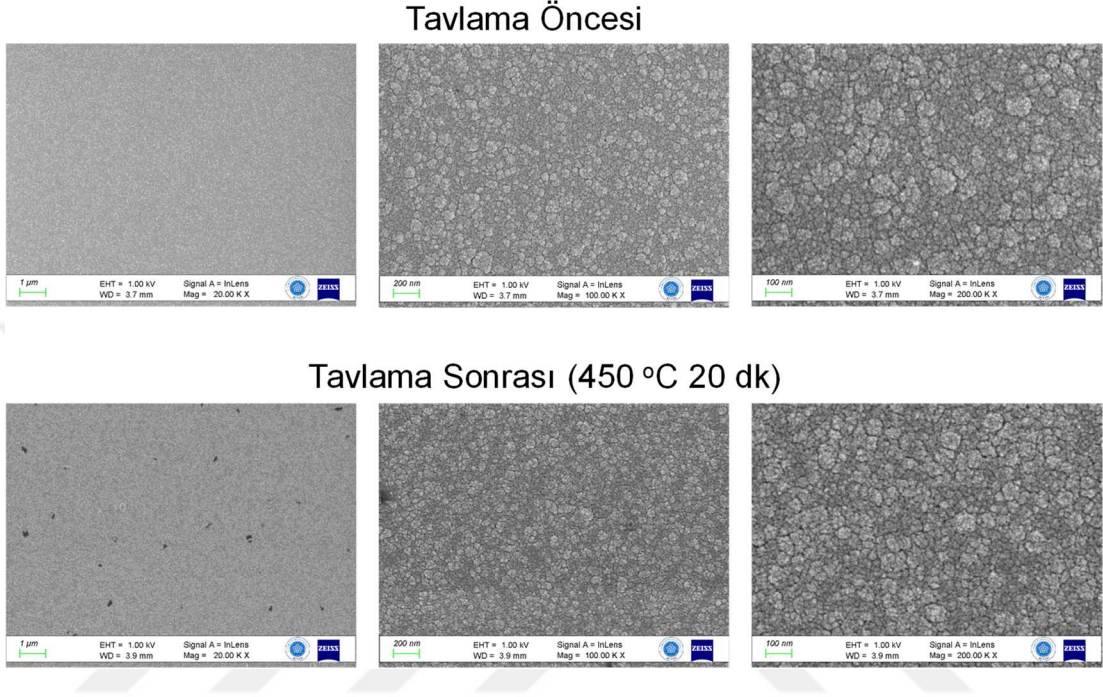
Şekil 4.44. FTO-6 örneğinin 450 °C'de 20 dakika tavllanması sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.



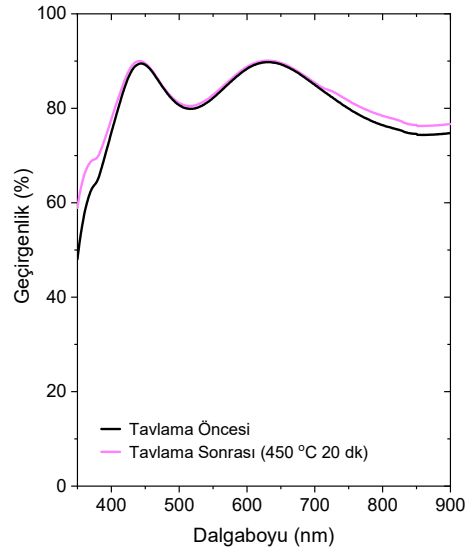
Şekil 4.45. FTO-7 örneğinin 450 °C'de 20 dakika tavllanması sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Şekil 4.43 incelendiğinde oda sıcaklığında hem lam hem de aşındırılmış FTO'nun üst yüzeyinde büyütülen filmlerde herhangi bir elektriksel direnç okunamamıştır. Şekil 4.44'te 450 °C'de tavlanan lam örneklerde (FTO-6) dirençler 28,3, 27,4 ve 22,6 kΩ olarak okunmuştur. Bu değerler tavlama sonrası için oldukça yüksek direnç değerleridir. Yine

aynı sıcaklıkta tavlanan aşındırılmış FTO örneklerde (FTO-7) (Şekil 4.45) dirençler 12,06, 4,45 ve 8,03 k Ω olarak okunmuştur. Bu değerler de yine yüksek değerler olup lam örneklerine göre daha iyidir. FTO-6 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası FESEM görüntüleri ile optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de gösterilmektedir.

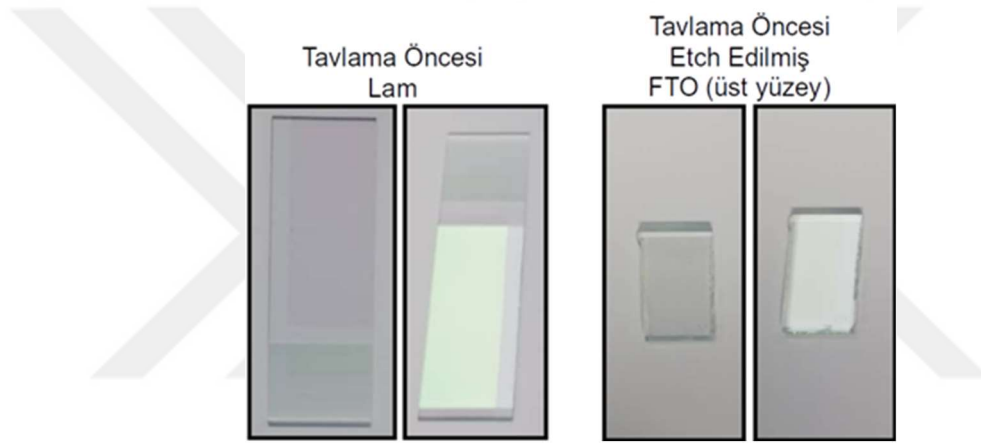


Şekil 4.46. FTO-6 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası 50K, 100K ve 200K büyütmeye ile elde edilen FESEM görüntüleri.



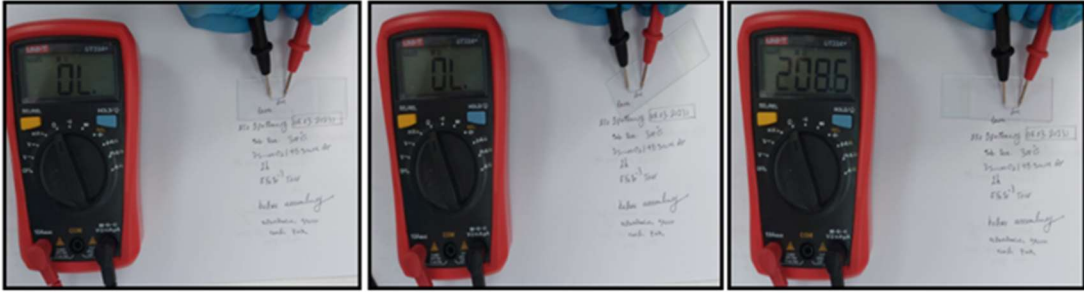
Şekil 4.47. FTO-6 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası optik geçirgenlik spektrumları.

Şekil 4.46 incelendiğinde tavlama öncesi ve tavlama sonrası FTO filmlerin morfolojik yapılarında anlamlı bir değişiklik bulunmazken Şekil 4.47’de tavllanmış FTO filmin optik geçirgenliğinin düşük ve yüksek dalga boylarında daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Alttaş oda sıcaklığında iken elde edilen filmlerde tavlama sonrası daha büyük dirençlerin elde edilmesinden dolayı alttaş sıcaklığının filmin kalitesini artırdığı düşüncesi ile alttaş sıcaklığı 300 °C’ye ayarlanmış ve bu sıcaklıkta büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir. FTO filmler lam üzerine (FTO-8) ve aşındırılmış FTO alttaşın üst kısmına (FTO-9) büyütülmüştür. Bu işlemde elde edilen filmlerin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları ile elektriksel direnç ölçümleri Şekil 4.48-4.50’de gösterilmektedir.

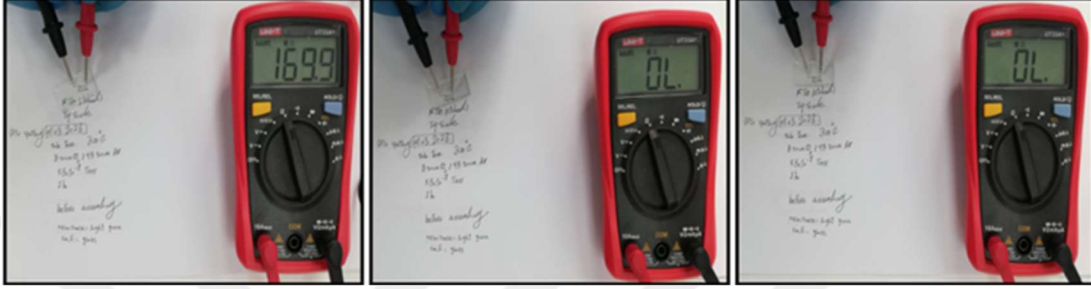


Şekil 4.48. FTO-8 ile FTO-9 örneklerinin tavlama öncesi fotoğrafları.

Tavlama Öncesi / Lam



Tavlama Öncesi / Etch Edilmiş FTO (üst yüzey)



Şekil 4.49. FTO-8 ve FTO-9 örneklerinin tavlama öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

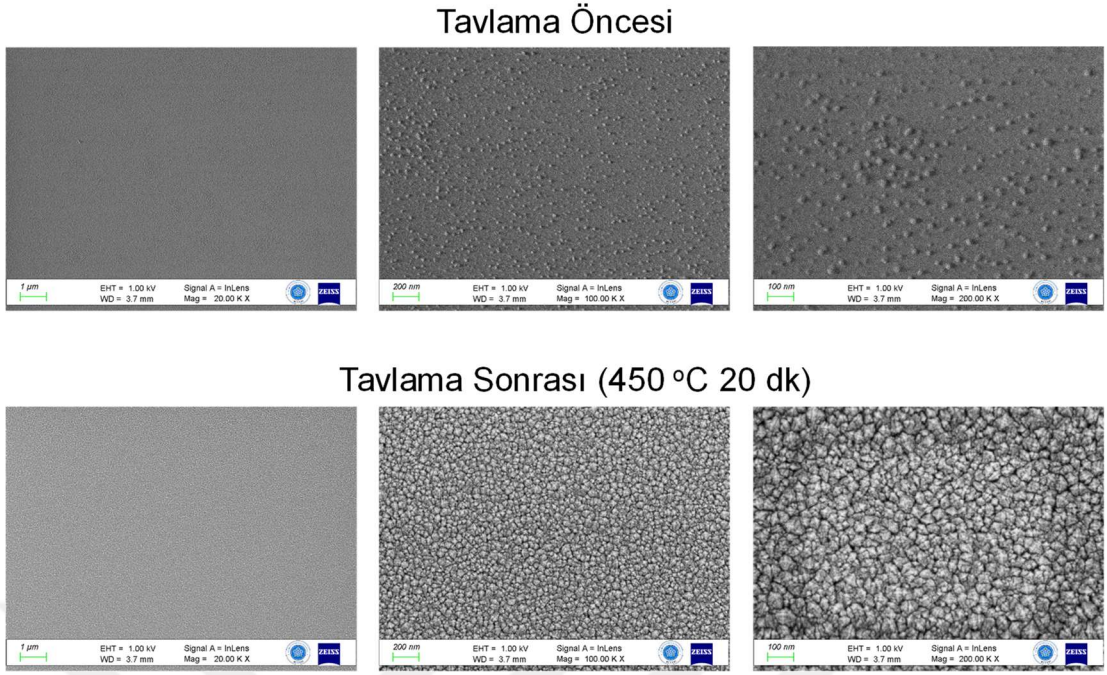
Tavlama Sonrası (450 °C 20 dk)



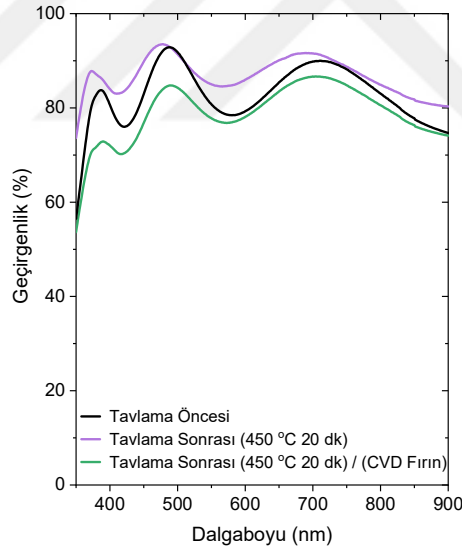
Şekil 4.50. FTO-8 örneğinin 450°C'de 20 dakika tavllanması sonucu farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Şekil 4.49'da görüldüğü üzere hem FTO-8 hem de FTO-9 örneklerinin tavlama öncesinde farklı noktalardan alınan dirençlerinde AVOMETRENİN okuma aralığı dışında dirençler elde edilmiş her iki örnekte de sadece bir kez $\sim 21 \text{ M}\Omega$ ve $\sim 17 \text{ M}\Omega$ direnç değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.50'de FTO-8 örneği tavlandıktan sonra FPP ile yapılan ölçümünde cm'de yaklaşık 46,8 k Ω direnç elde edilmiştir. Bu değerler olması gereken değerlere hayli uzak değerlerdir.

Elde edilen filmlerin FESEM görüntüleri ve optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de gösterilmektedir.



Şekil 4.51. FTO-8 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.



Şekil 4.52. FTO-8 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası optik geçirgenlik spektrumları.

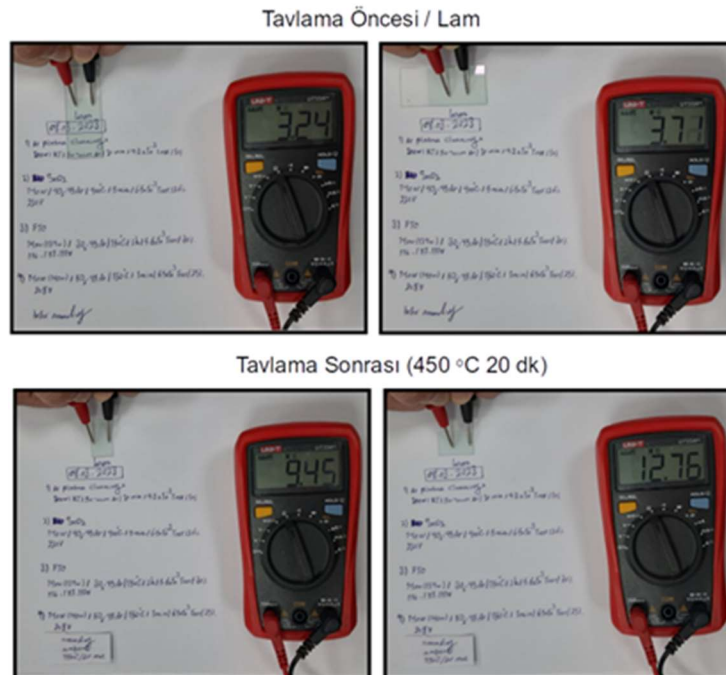
Şekil 4.51’de görüldüğü üzere tavlama öncesi filmlerde belirgin tanecikler yok iken tavlama sonunda film yüzeyinde tanecikler oluşmuştur. Şekil 4.52’de ise atmosfer ortamında tavlanan filmin optik geçirgenliğinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Daha önce nitrojen ortamında tavlanan filmlerin optik geçirgenliği düşürdüğü tespit edilse de üretilen bu filmin de optik geçirgenliğinin nasıl değiştiğini tespit etmek için nitrojen

ortamında kimyasal buhar biriktirme (CVD) içinde tavlama yapılmıştır. Filmin ilk halinden daha koyu olduğu gözle görüldüğü gibi optik geçirgenlik spektrumunda da gösterilmiştir. Ancak üretilen filmlerin hiçbirinde elektriksel olarak istenilen seviyeye inilememiştir.

FTO filmlerin kristallenmesini artırmak için FTO'nun ana kristal yapısını oluşturan SnO_2 'yi FTO büyütmeden önce bir tampon tabaka büyütme işlemi düşünülmüştür. Bu amaçla temizlenmiş lam alttaş üzerine daha önce yapılan bir proje kapsamında başarı ile büyütülen SnO_2 filmin büyütme parametreleri kullanılarak tampon tabaka büyütülmüştür. SnO_2 büyütme parametresi olarak %99,9 saflığa sahip SnO_2 hedef malzemesi, 400 °C alttaş sıcaklığı, 5 sccm O_2 ve 45 sccm Ar gazlarının akışı, 137 W RF güç ve 90 saniye büyütme süresi kullanılmıştır.

FTO film büyütüldükten sonra flor konsantrasyonunun FTO filmlerde önemli bir rol oynadığı yapılan çalışmalarda gösterildiğinden tavlama sonrası flor miktarının azalmaması için FTO filmin üst yüzeyine tekrar bir SnO_2 tabakası kaplanmıştır. Yani FTO film iki SnO_2 tabakası arasına yerleştirilmiştir. Ancak üstteki SnO_2 tabakası FTO'nun büyütme sıcaklığı 150 °C'de gerçekleştirilmiştir.

Bu şekilde en uygun kristal formasyonun harici tavlama işlemi esnasında oluşması planlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan film (FTO-10)'un tavlama öncesi ve tavlama sonrası direnç ölçümlerine ilişkin görsel Şekil 4.53'te sunulmuştur.



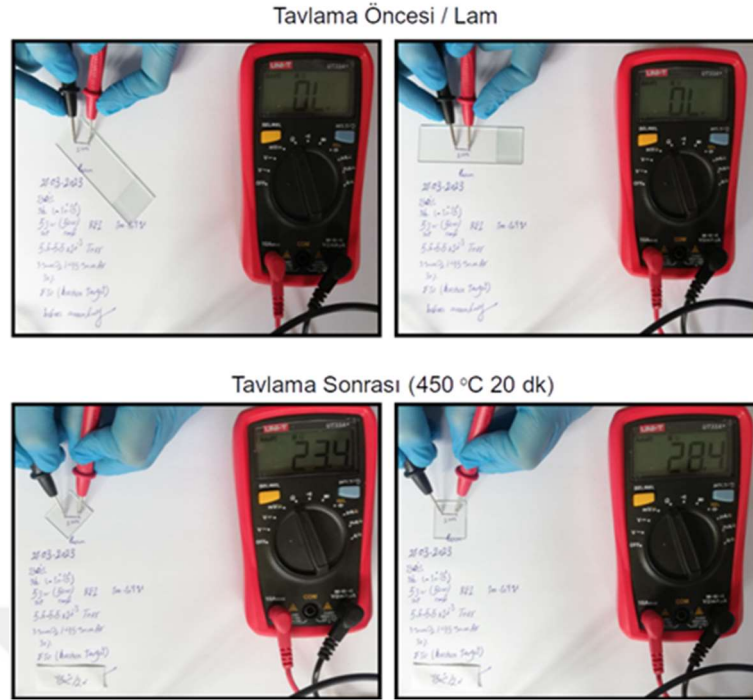
Şekil 4.53. FTO-10 örneğinin tavlama öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Yapılan ölçümler sonucunda tavlama öncesi 3,24 M Ω ve 3,71 M Ω dirençler tavlama sonunda 9,45 M Ω ve 12,76 M Ω değerine yükselmiştir. Bu tavlama işlemi esnasında SnO₂ üst tabakasının flor ile etkileşime girmediği ve yüksek bir tabaka direnci sağladığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu yüksek direnç değerlerinden dolayı bu optimizasyon basamağı için herhangi bir karakterizasyon işlemi gerçekleştirilmemiştir.

FTO çalışmalarında başarısız olunan kısım elektriksel direnç olduğundan ve elektriksel direncin film kalınlığı ile azaltılabileceği düşüncesinden hareketle FTO-11 örneği üretilmiştir. FTO örneği üretilirken güç, oksijen, basınç ve alttaş sıcaklığı parametreleri sabit tutularak daha önce 60 dakika olarak belirlenen üretim süresinin 180 dakikaya çıkarılması ile elde edilmiştir. Bu örneğe ilişkin fotoğraf ve elektriksel direnç ölçümleri Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te gösterilmektedir.



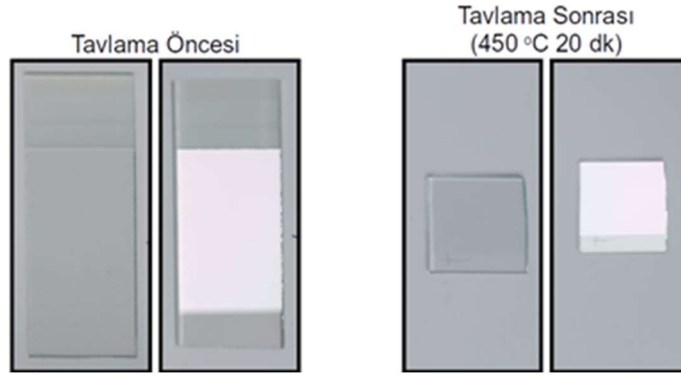
Şekil 4.54. FTO-11 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.



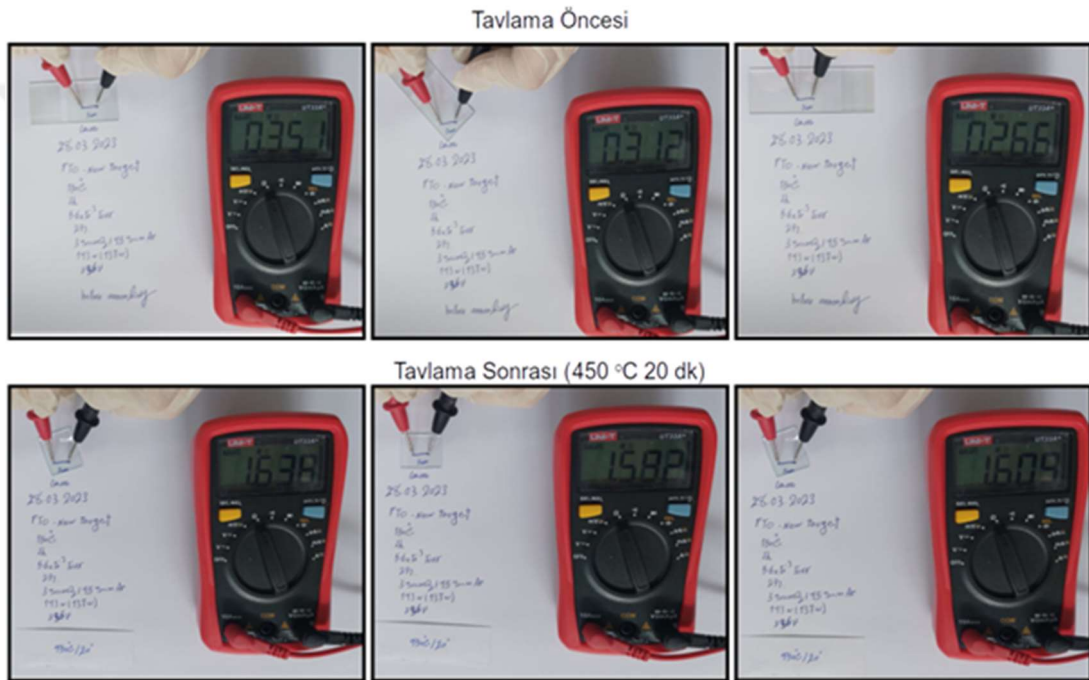
Şekil 4.55. FTO-11 örneğinin tavlama öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Yapılan ölçümlerde FTO-11 örneğinin tavlama öncesinde ölçülen elektriksel direnci AVO metrenin okuma limitleri dışında olup 450 °C’de tavlama sonucunda okunan elektriksel dirençleri 23,4 M Ω ve 28,4 M Ω olarak ölçülmüştür. Bu değerler oldukça yüksek direnç değerleri olup kalınlık artışı ile direnç değeri arasındaki artışın arasında anlamlı bir bağlantı kurulamamıştır.

Büyütme işlemlerinin başarısızlıkla sonuçlanması sonucu yeni bir FTO target denenmesi düşünülmüş ve bu amaçla magnetrona aynı %99,99 saflığa Goodwill marka FTO hedef konulmuş ve yeniden aynı şartlarda üretim yapılmıştır. Böylece iki hedef malzeme arasında bir farklılık olup olmadığının tespitinin yapılması amaçlanmıştır. Yeni hedef malzeme ile üretilen filmin (FTO-12) fotoğrafı ve elektriksel direnç değerleri Şekil 4.56 ve Şekil 4.57’de gösterilmektedir.

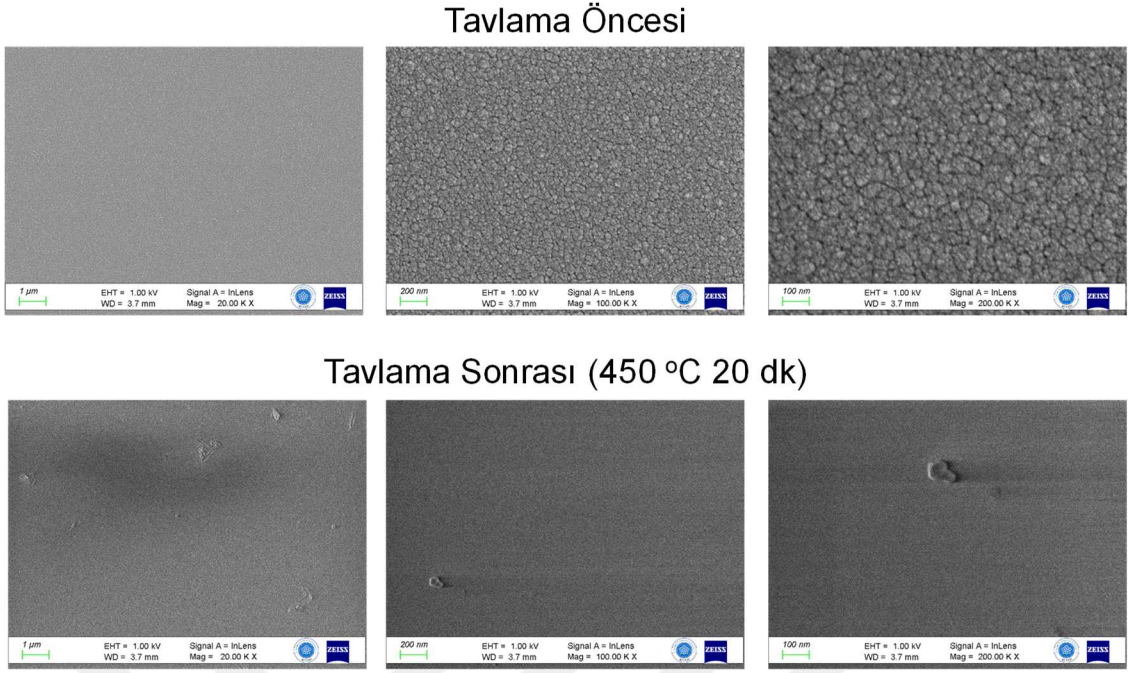


Şekil 4.56. FTO-12 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası fotoğrafları.

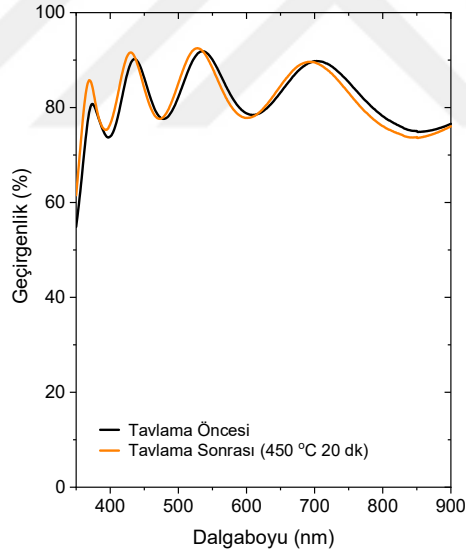


Şekil 4.57. FTO-12 örneğinin tavlama öncesi farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Yeni hedef malzemesi ile üretilen FTO-12 örneğinin elektriksel direnç ölçümleri incelendiğinde tavlama öncesi 0,351 MΩ, 0,312 MΩ ve 0,266 MΩ olarak ölçülen elektriksel dirençler tavlama sonunda 1,638 MΩ, 1,582 MΩ ve 1,609 MΩ olarak ölçülmüştür. Elektriksel dirençte herhangi bir azalma yaşanmamış aksine bir artış gözlemlenmiştir. FTO-12 örneğine ilişkin FESEM görüntüleri ve optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da gösterilmektedir.



Şekil 4.58. FTO-12 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.

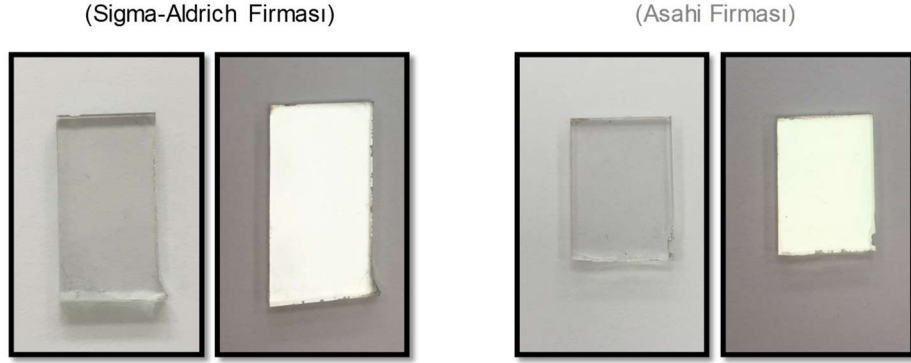


Şekil 4.59. FTO-12 örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası optik geçirgenlik spektrumları.

Şekil 4.58 ve Şekil 4.59 incelendiğinde FTO-12 örneğinde tavlama ile taneciklerin kaybolduğu ve homojen bir yüzeyin elde edildiği görülmektedir. Optik geçirgenlik ise %80 civarında olup ticari FTO'nun sahip olduğu değerlere yakındır.

Yapılan üretimlerin karşılaştırılması amacıyla ticari olarak Sigma-Aldrich ve Asahi Firmalarından alınan FTO'nun karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu

iki firmadan elde edilen örneklerin fotoğrafları, AVOMETRE ile gerçekleştirilen elektriksel direnç ölçümleri ve FPP ile gerçekleştirilen elektriksel ölçümleri sırasıyla Şekil 4.60 ve Şekil 4.61’de gösterilmektedir.

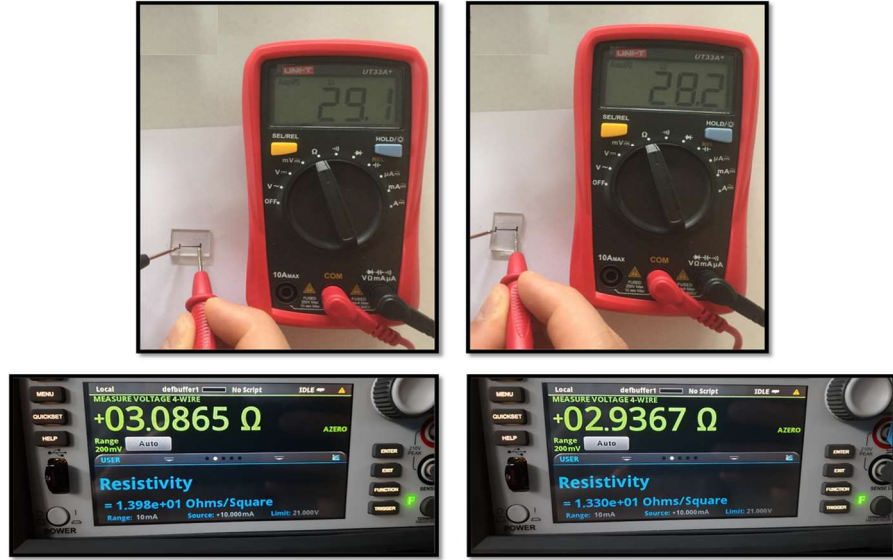


Şekil 4.60. Sigma-Aldrich ve Asahi firmalarına ait ticari FTO örneklerinin fotoğrafları.

(Sigma-Aldrich Firması)

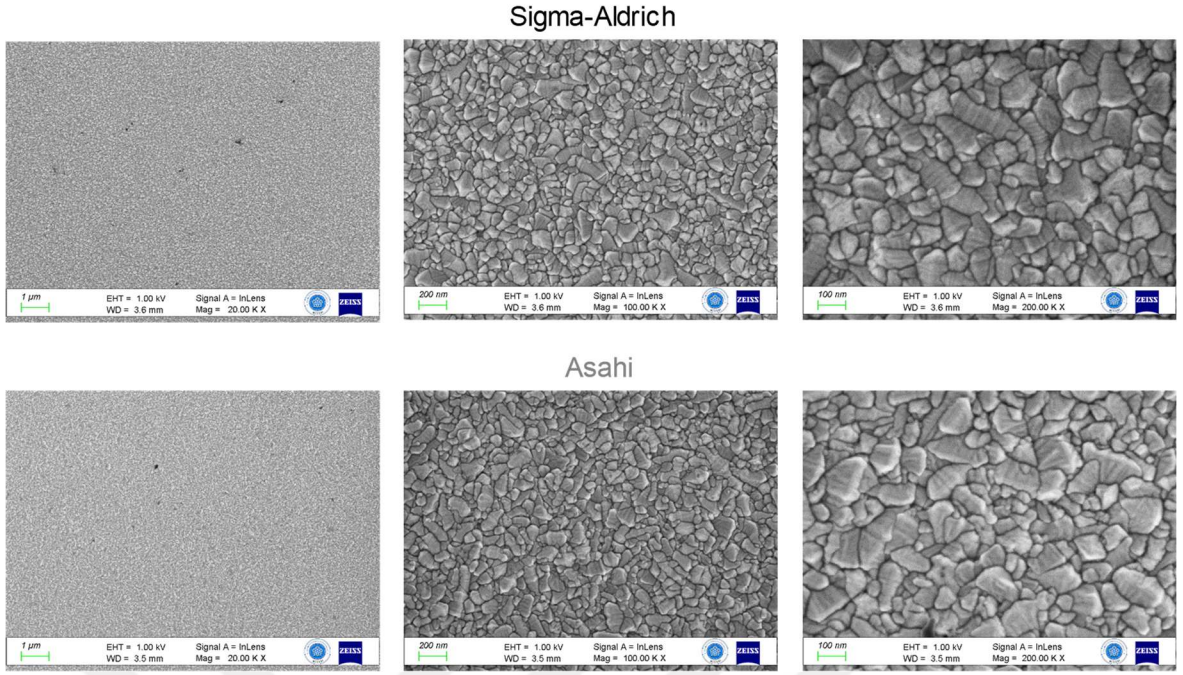


(Asahi Firması)

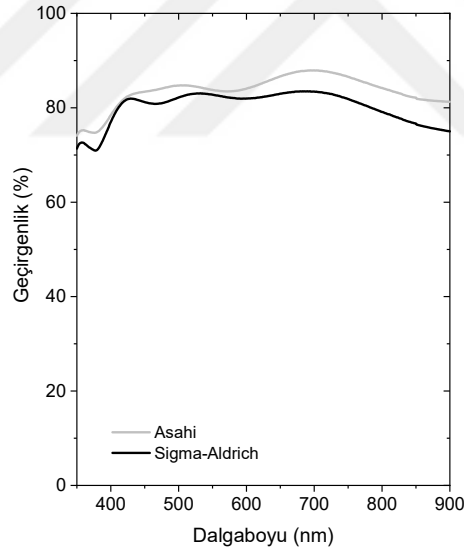


Şekil 4.61. Sigma-Aldrich ve Asahi firmalarına ait ticari FTO örneklerinin farklı noktalarından alınan elektriksel direnç ölçümleri.

Ticari FTO örnekleri incelendiğinde Sigma-Aldrich'ten temin edilen örneğin 1 cm mesafede okunan direnç değeri yaklaşık 28-29 Ω aralığında iken Asahi firmasından temin edilen örneğin 1 cm mesafede okunan direnci 29-30 Ω olarak tespit edilmiştir. Bu değerler üretilen örneklerden elde edilen dirençlerden birkaç mertebe daha düşüktür. Filmlerin yüzey morfolojilerini içeren FESEM görüntüleri ve optik geçirgenlik spektrumları sırasıyla Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'te gösterilmektedir.



Şekil 4.62. Ticari FTO filmlerin 50K, 100K ve 200K büyütme ile elde edilen FESEM görüntüleri.



Şekil 4.63. Ticari FTO filmlerin optik geçirgenlikleri.

Şekil 4.62 incelendiğinde filmlerde aralarında boşluk olmayacak şekilde homojen olmayan tanecikler görülmektedir. Proje kapsamında büyütülen filmlerde tanecikler arasında boşluklar varken ticari filmlerde bu boşluklar yer almamaktadır. Bu boşlukların elektriksel direnci kötüleştirdiği ve elektron transferini zorlaştırdığı olarak yorumlanmıştır. Bununla birlikte ticari filmlerin 300 – 450 nm aralığında optik geçirgenlik %70 üzerinde iken ~450 nm ve üzerinde %80 üzeri geçirgenliği olduğu

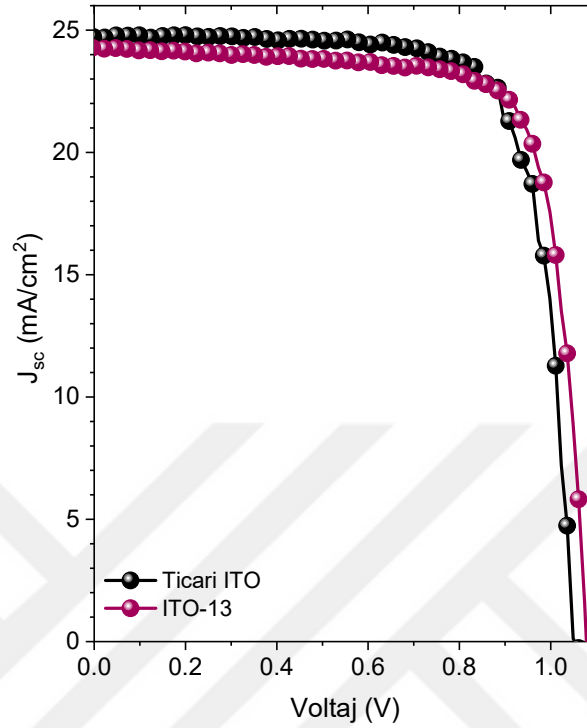
görülmektedir. Girişim saçakları filmlerin kalınlığının proje kapsamında büyütülen filmlerden daha düşük olduğunu göstermektedir.

4.3. Hücre Üretim ve Karakterizasyon Çalışmaları

Bu bölümde gerçekleştirilen hücre üretim ve karakterizasyon çalışmaları hem elektriksel hem de optik özellikler açısından yüksek performans sergileyen alt tabaka malzemeleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Çalışmalarda, hücrelerin üretiminde ITO-13 kodlu alttaşlar tercih edilmiştir. Bu tercih, ticari alttaşlarla karşılaştırılabilir özellikler sunması ve daha yüksek verim potansiyeli taşıması nedeniyle yapılmıştır. Başlangıçta FTO alttaşlar ile de üretim çalışmaları gerçekleştirilmiş, ancak bu alttaşlardan elde edilen optik ve elektriksel ölçüm sonuçlarının istenen performansı sergilememesi nedeniyle FTO temelli hücre üretimlerinden vazgeçilmiştir. FTO, belirli uygulamalar için umut vaat edici olmasına rağmen, bu çalışmada elde edilen düşük optik geçirgenlik ve yüksek elektriksel direnç değerleri, bu malzemenin hücre performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmuştur. Bu nedenle, hücre üretimi için daha yüksek verim sağlayan ITO alttaşlara yönelinmiştir.

En yüksek verimi sunan şampiyon hücrelere ait J-V karakteristikleri Şekil 4.64'de sunulmuş olup, ilgili fotovoltaiik parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ticari ITO kullanılan hücrelerin daha düşük film kalınlığına bağlı olarak kısmen daha yüksek bir kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) değeri sunduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, ticari ITO'nun daha ince yapısının güneş ışığını daha etkin bir şekilde transfer ederek J_{sc} değerini artırmasıdır. Ancak, ITO-13 tabanlı hücrenin daha yüksek açık devre gerilimi (V_{oc}) ve dolum faktörü (FF) sunduğu dikkat çekmektedir. ITO-13'ün bu avantajı, kullanılan filmdeki daha iyi kristal yapısı ve arayüzey kalitesi ile ilişkilendirilebilir. ITO-13'ün daha düşük seri direnci ve daha iyi taşıyıcı hareketliliği, bu parametrelerdeki iyileşmenin temel nedenleri olarak öne çıkmaktadır. Bu iyileşmelerin doğrudan bir sonucu olarak, ticari ITO kullanılan hücre veriminden (%20,02) daha yüksek bir verim (%20,15) elde edilmiştir. V_{oc} ve FF değerlerinde meydana gelen bu kısmi iyileşme, ITO-13 filminin daha üstün elektriksel özellikler sunmasıyla açıklanabilir. ITO-13'ün daha düşük direnci, daha etkin yük taşıyıcı geçişine olanak tanıyarak enerji kayıplarını azaltmakta ve dolayısıyla daha yüksek bir dolum faktörü elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, ITO-13'ün stabil yapısının uzun vadeli performans ve hücre dayanıklılığı açısından da önemli katkılar sunduğu düşünülmektedir.

Bu sonuçlar, ITO-13'ün güneş hücrelerinde ticari ITO'ya kıyasla daha rekabetçi ve verimli bir alternatif olabileceğini göstermektedir.



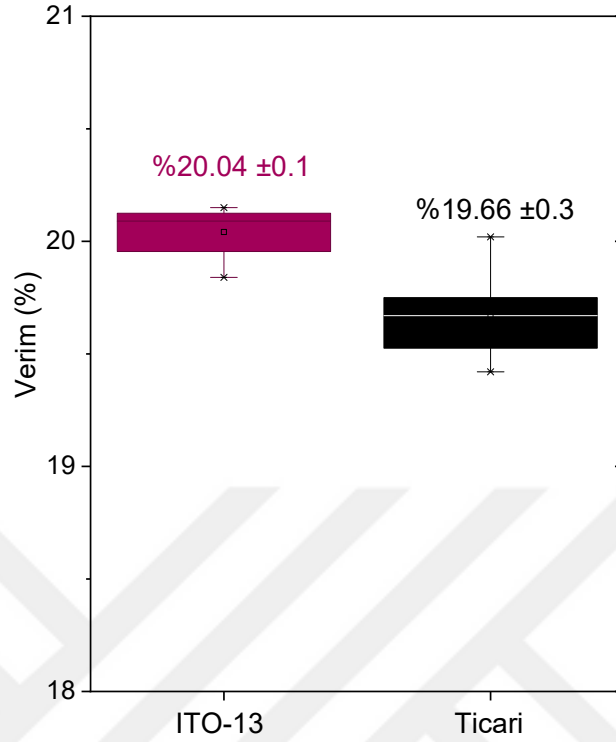
Şekil 4.64. Şampiyon güneş hücrelerine ait J-V karakteristik eğrileri.

Çizelge 4.2. Ticari ITO ve tez çalışması kapsamında geliştirilen ITO (ITO-13) tabanlı PGH'lerin şampiyon ve ortalama fotovoltaik parametreleri.

ITO	V_{OC} (V)		J_{SC} (mA.cm ⁻²)		FF (%)		PCE (%)	
	Şampiyon	Ortalama	Şampiyon	Ortalama	Şampiyon	Ortalama	Şampiyon	Ortalama
Ticari	1,05	1,04 ±0,01	24,72	24,54 ±0,14	76,9	76,3 ±0,5	20,02	19,66 ±0,3
ITO-13	1,08	1,07 ±0,01	24,27	24,26 ±0,03	77,0	76,9 ±0,1	20,15	20,04 ±0,1

Elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini göstermek amacıyla, her iki hücre türü için de en az 8 adet hücre üretilmiş ve Çizelge 4.2'de sunulan fotovoltaik parametreler, Şekil 4.65'de verilen histogram grafiğinde de görselleştirilmiştir. Bu analizler, her iki ITO alttaşının da yüksek düzeyde tekrarlanabilirlik sunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçların bu denli tutarlı olması, her iki alttaşın da üretim süreçleri boyunca homojen ve uniform kaplamalar sağladığını göstermektedir. Homojen kaplama, özellikle güneş hücrelerinin elektriksel ve optik performansı açısından kritik bir rol oynadığından, bu

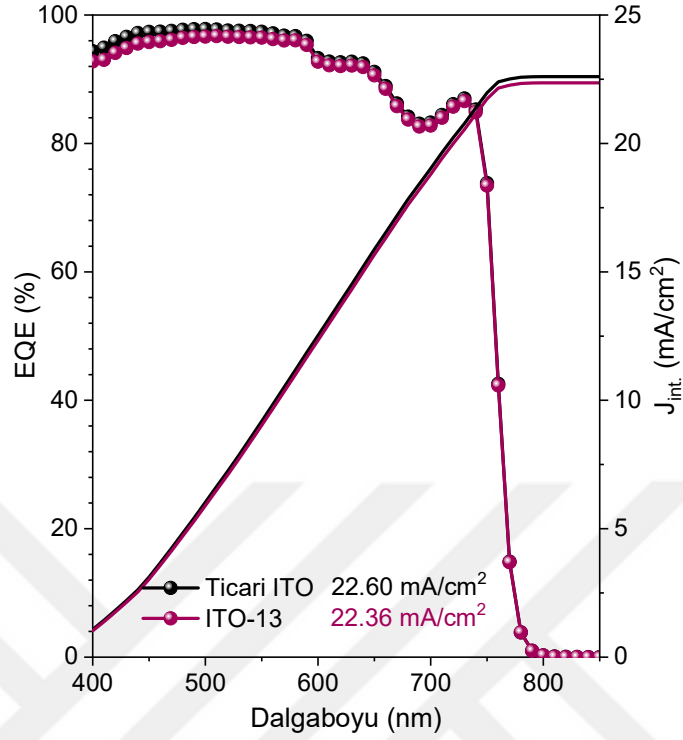
sonuçlar ticari ITO ve ITO-13 alttaşlarının üretim süreçlerinin güvenilir olduğunu ve tekrarlanabilir yüksek performans sunduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.65. Ticari ITO ve ITO-13 tabanlı güneş hücrelerinin fotovoltaik parametrelerinin histogram grafiği.

EQE, bir güneş hücresinin gelen fotonları elektrona dönüştürme yeteneğini ölçen önemli bir performans parametresidir. EQE, belirli bir dalga boyundaki ışık fotonlarının ne kadarının hücre tarafından emilip elektrığe dönüştürüldüğünü gösterir. Yüksek EQE değerleri, hücrenin geniş bir spektrum aralığında etkili çalıştığını ve ışığı verimli bir şekilde elektrığe dönüştürdüğünü ifade eder, bu da genel verimliliği artıran kritik bir faktördür. Şekil 4.66'da verilen hücrelere ait EQE karakteristikleri incelendiğinde, geniş bir spektrum aralığında etkili bir foton dönüşümü gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, hücrelerin fotovoltaik performanslarının spektral yanıt açısından oldukça verimli olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, EQE eğrilerinden hesaplanan entegre kısa devre akım yoğunluğu ($J_{int.}$) değerlerinin (ticari ITO için 22,60 ve ITO-13 için 22,36 mA/cm²), J-V karakteristiklerinde gözlemlenen J_{sc} trendi ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyum, hücrelerin fotonları etkin bir şekilde absorbe edip elektrığe dönüştürme yeteneğinin hem EQE analizleri hem de J-V karakteristikleri ile tutarlı olduğunu doğrulamaktadır. Özellikle, geniş spektral bölgede yüksek EQE değerlerinin elde edilmesi, hücrelerin geniş bant aralıklı ışık spektrumunda yüksek performans

gösterdiğinin bir kanıtıdır. Bu veriler, fotovoltaik performansın optimizasyonunda kullanılan malzeme ve yapısal düzenlemelerin etkinliğini de ortaya koymaktadır.



Şekil 4.66. Ticari ITO ve ITO-13 tabanlı güneş hücrelerinin EQE karakteristikleri.

Bu bölümde sunulan hücre üretim ve karakterizasyon çalışmaları, farklı alttaşlar kullanılarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle tamamlanmıştır. Sonuçlar, ticari ITO ve ITO-13 alttaşlarının karşılaştırılmasında, her iki malzemenin de yüksek performans sunduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, ITO-13 tabanlı hücrelerin daha iyi V_{oc} ve FF sunması, bu malzemenin daha iyi elektriksel özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Ticari ITO alttaşlarının daha ince yapısı, yüksek J_{sc} ile sonuçlanırken, ITO-13 tabanlı hücreler verimlilik açısından daha üstün performans göstermiştir. Ayrıca, her iki hücre türünün de üretim süreçleri boyunca homojen ve uniform kaplamalar sağladığı ve yüksek tekrarlanabilirlik sunduğu doğrulanmıştır. Bunun yanında, EQE analizleri de hücrelerin geniş spektrum aralığında etkili bir foton dönüşümü gerçekleştirdiğini ve J_{sc} değerleri ile uyumlu entegre J_{sc} sonuçları verdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, hücrelerin fotovoltaik performanslarının optimize edildiğini ve hem ticari hem de deneysel alttaşların gelecekteki güneş hücresi uygulamalarında kullanılabilirliğini kanıtlamıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan ITO-13 alttaşının ticari ITO'ya kıyasla daha rekabetçi bir alternatif olabileceği gösterilmiştir ve ilerleyen çalışmalarla daha yüksek performans elde etme potansiyeline sahiptir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez kapsamında magnetron saçtırma sistemi ile üretilmesi planlanan ITO ve FTO saydam iletken oksit filmlerin büyütülmesi ve elde edilen filmlerin ticari filmlerin özelliklerine yakın veya daha iyi özellikler sergilemesi amacı ile bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretimler esnasında depozisyon basıncında değişiklik yapılmaması yoluna gidilmiştir. Bunun nedeni olarak hem FTO hem de ITO hedef malzemelerde düşük depozisyon basınçlarında plazmanın stabilitesi bozulmakta ve bir süre sonra plazma yok olmaktadır. Bundan dolayı sistem için ideal kabul edilen $\sim 5 \times 10^{-3}$ Torr basınç değeri bütün üretimler için korunmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte maliyetinin düşük olması ve bütün üretimler için bir standart oluşturması adına 1 mm kalınlıklı altaşlar kullanılmıştır. Her film üretiminden sonra gözle yapılan saydamlık kontrolü ve ardından AVometre ile gerçekleştirilen elektriksel ölçümler optimizasyon sürecini kontrol etmiştir. Elektriksel direnç büyük çıktığında veya optik geçirgenlik belirgin şekilde düşük çıktığında yapısal ve/veya optik karakterizasyon işlemlerine devam edilmemiştir. Yüksek DC magnetron gücü kullanılarak (350 W) altaş sıcaklığı oda sıcaklığında iken büyütülen filmlerin 450 °C'de 30 dakika ve 5 dakika sürelerince tavlanması sonucu elde edilen ITO filmlerin (ITO-12 ve ITO-13) elektriksel özellikleri ticari ITO ile aynı hatta bir miktar iyi olarak tespit edilmiştir. Ancak, optik geçirgenlikler incelendiğinde kısa dalga boylarında geçirgenliğinin bir ticari ITO değerinden bir miktar daha düşük kaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak büyütülen filmlerin kalınlığının ticari ITO değerinden daha fazla olduğu düşünülmektedir. Kalınlık optimizasyonu ile standart ITO altaş kalınlığı olan ~ 200 nm kalınlığındaki altaş kullanılarak büyütülecek filmlerin ticari ITO filmlerin özelliğini taşıması oldukça muhtemeldir.

FTO filmlerde ilk olarak film büyütme işlemi esnasında ortamdaki oksijenin etkisi araştırılmış ve oksijenin filmin özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bundan dolayı en uygun değer olan $O_2/(Ar+O_2)$ oranı olarak 1/16 değeri bütün FTO üretimlerinde sabit tutulmuştur. Daha sonra altaş sıcaklığının etkisi incelenmiş ve en ideal sıcaklığın 150 °C olduğuna karar verilmiştir. Gerek lam altaşlara gerek altaştan kaynaklanabilecek etkinin olup olmadığını sorgulamak amacı ile ticari FTO'nun aşındırılması ile elde edilen cam altaşlara büyütülen filmlerde istenilen direnç değerine inilememiştir. Optik saydamlık olarak ticari filmlere yakın olsalar da elektriksel direnç değerleri birkaç merteye büyük

kalmaktadır. FTO filmin tavlama esnasında flor oranının azalmaması amacı ile SnO₂ filmler arasına alınması bile filmin elektriksel özelliklerini iyileştirmeye yetmemiştir. Daha sonra hedeften kaynaklanabilecek etkinin olup olmadığının anlaşılması için yeni bir hedef malzeme takılmış ve aynı şartlarda üretimler yapılmıştır ancak direnç değerleri oldukça yüksek kalmıştır. Tavlama ortamında oksijenin etkisinin olup olmadığını anlamak amacı ile CVD sistemi içinde inert ortamda tavlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlem optik geçirgenliği oldukça düşürmüştür. Dolayısı ile atmosfer ortamında tavlama işleminin yapılması uygun görülmüştür. Tavlama süresinin ise filmin özelliklerini geliştirmede herhangi lineer bir etkisinin olmamasından dolayı bütün FTO filmler için tavlama süreleri 20 dakika olarak alınmıştır. Düşük sıcaklıklarda tavlama işlemi FTO filmin özelliklerini geliştirmezken 450 °C tavlama sıcaklığında direnç değerler düşse de yine ticari FTO'lar ile karşılaştırılabilecek mertebelere inememiştir. Daha yüksek tavlama sıcaklığı lam alttaşı için uygun olmamakla birlikte yapılan birkaç denemede yine direnç değerini değiştirmemiştir.

ITO-13 kodlu alttaşılar, film karakterizasyon çalışmalarında yüksek kristal kalitesi, düzgün morfoloji ve uygun elektriksel özellikler sergilemiştir. Yapılan hücre performans testlerinde de bu alttaşıların, ticari ITO (Sigma-Aldrich) kullanılan hücrelerle karşılaştırıldığında rekabetçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ticari ITO tabanlı hücreler ile yapılan karşılaştırmalarda, ITO-13 tabanlı hücrelerin optik geçirgenliği ve elektriksel iletkenlik açısından benzer performans sergilediği, hatta bazı durumlarda daha üstün sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak, hücre üretiminde kullanılan ITO-13 kodlu alttaşılar, ticari ITO ile karşılaştırıldığında yüksek performans potansiyeli sunan alternatif bir alttaşı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar, hücre üretiminde kullanılan malzemelerin optimizasyonunun, hücre verimliliği ve kararlılığı üzerinde ne denli etkili olduğunu ortaya koymuş ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir referans noktası oluşturmuştur.

5.2 Öneriler

Flor elementinin yüksek kaliteli FTO filmlerin üretiminde kritik bir rol oynadığı bilinmektedir. Bu doğrultuda, karbon tetraflorür (CF₄) gazının büyütme süreci esnasında sisteme verilmesi, flor katkısının film özellikleri üzerindeki etkisini derinlemesine incelemek adına önem arz etmektedir. Ancak, sistemin ventilasyon kapasitesinin yetersiz olması ve CF₄ gazının temin edilememesi, florun FTO film üzerindeki etkilerinin tam

anlamıyla araştırılmamasına yol açmıştır. Gelecekte bu konuyla ilgilenecek araştırmacılar için, bu eksikliğin giderilmesi ve CF₄ gazı ile ilgili daha kapsamlı çalışmalar yapılması önerilmektedir. Bu, FTO filmlerin iletkenlik ve optik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından değerli bir katkı sağlayabilir.

FTO ve ITO filmlerin özellikleri üzerinde büyütme gücünün etkisi yeterince incelenememiştir. Büyütme gücü, film kalınlığı, morfolojisi ve kristal yapısı üzerinde belirleyici bir faktör olabilir. Bu nedenle, yüksek kaliteli ve fonksiyonel filmler elde etmek için büyütme gücünün etkilerinin detaylı bir şekilde araştırılması önerilmektedir. Bu tür çalışmalar, FTO ve ITO filmlerin performans optimizasyonu için önemli bir yol gösterici olabilir.

İndiyumun sınırlı olması, ITO filmlerin sürdürülebilirliğini kısıtlayıcı bir faktör haline getirmektedir. Bu nedenle, indiyuma alternatif malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin sputtering yöntemi ya da diğer film büyütme teknikleri ile üretilmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, alternatif oksit bazlı iletken filmler veya karbon bazlı nanomalzemeler gibi yenilikçi malzemelerin araştırılması, optoelektronik teknolojisinde yeni ufuklar açabilir ve maliyet-etkin çözümler sunabilir.

FTO ve ITO filmlerin optoelektronik performansını artırmak için sinterleme ve ısı işlemlerin etkileri üzerinde detaylı çalışmalar yapılması önerilmektedir. Bu süreçler, film yoğunluğu, kristallik derecesi ve iletkenlik gibi kritik özellikleri iyileştirebilir. Bu bağlamda, farklı sıcaklık ve süre kombinasyonlarının film özellikleri üzerindeki etkilerinin sistematik olarak araştırılması, daha ileri düzeyde film optimizasyonu sağlayabilir.

FTO ve ITO filmlerin optoelektronik cihazlarda verimliliğini artırmak amacıyla çok katmanlı yapıların kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Farklı malzemelerle kombine edilerek elde edilecek çok katmanlı yapıların optik geçirgenlik, elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım gibi parametreler üzerindeki etkilerinin incelenmesi, bu alanın daha fazla gelişmesine katkıda bulunabilir. Bu tür araştırmalar, yüksek performanslı ve uzun ömürlü optoelektronik cihazların geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Ahn, M. H., Cho, E. S., & Kwon, S. J. 2011. Effect of the duty ratio on the indium tin oxide (ITO) film deposited by in-line pulsed DC magnetron sputtering method for resistive touch panel. *Applied Surface Science*, 258(3), 1242-1248. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.09.081>.
- Akin, S., Akman, E., & Sonmezoglu, S., 2020, FAPbI₃-based perovskite solar cells employing hexyl-based ionic liquid with an efficiency over 20% and excellent long-term stability. *Advanced Functional Materials*, 30(28), 2002964. <https://doi.org/10.1002/adfm.202002964>.
- Akin, S., Bauer, M., Hertel, D., Meerholz, K., Zakeeruddin, S. M., Graetzel, M., Bäuerle, P., & Dar, M. I., 2022, Robust nonspiro-based hole conductors for high-efficiency perovskite solar cells. *Advanced Functional Materials*, 32(45), 2205729. <https://doi.org/10.1002/adfm.202205729>.
- Akman, E., & Akin, S., 2021, Poly (*N, N'*-bis-4-butylphenyl- *N, N'*-bisphenyl)benzidine-based interfacial passivation strategy promoting efficiency and operational stability of perovskite solar cells in regular architecture. *Advanced Materials*, 33(2), 2006087. <https://doi.org/10.1002/adma.202006087>.
- Amalathas, A. P., & Alkaisi, M. M., 2016, Effects of film thickness and sputtering power on properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering without oxygen. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(10), 11064–11071. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5223-9>.
- Ari, D. A., Sezgin, A., Unal, M., Akman, E., Yavuz, I., Liang, F. C., Yilmaz, M., & Akin, S., 2023, Design of an amorphous ZnWSe₂ alloy-based counter electrode for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry Frontiers*, <https://doi.org/10.1039/D3QM00320E>.
- Askari, H., Fallah, H., Askari, M., & Mohmmadieyh, M. C. 2014. Electrical and optical properties of ITO thin films prepared by DC magnetron sputtering for low-emitting coatings. *arXiv preprint arXiv:1409.5293*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.5293>.
- Asri, R. I. M., Hamzah, N. A., Ahmad, M. A., Taib, M. I. M., Sahil, S. M. S., & Hassan, Z., 2020, Role of RF magnetron sputtering power on optical and electrical properties of ITO films on soda-lime glass substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 1535(1), 12035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1535/1/012035>.
- Badgujar, A. C., Yadav, B. S., Jha, G. K., & Dhage, S. R. 2022. Room temperature sputtered aluminum-doped ZnO thin film transparent electrode for application in solar cells and for low-band-gap optoelectronic devices. *ACS omega*, 7(16), 14203-14210. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00830>.
- Balaji, G., Kondapavuluri, B., Liu, W. S., Balasundaraprabhu, R., & Prasanna, S. 2024. Comparative study of indium tin oxide and indium gallium zinc oxide as potential

- n-type materials for the fabrication of all inorganic transparent solar cells. *Materials Letters*, 358, 135876. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.135876>.
- Banyamin, Z. Y., Kelly, P. J., West, G., & Boardman, J. 2014. Electrical and optical properties of fluorine doped tin oxide thin films prepared by magnetron sputtering. *Coatings*, 4(4), 732-746. <https://doi.org/10.3390/coatings4040732>.
- Bunshah, R.F., 1980, High Rate PVD Processes, 21-26, Agard Lecture Series No: 106, Materials Coating Techniques, Harford House, London.
- Campos, B. M. de, Freiria, G. S., Ciuffi, K. J., Faria, E. H. de, Rocha, L. A., Nassar, E. J., & Lima, M. S. F. de., 2017, ITO Obtained by spray pyrolysis and coating on glass substrate. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 28(12), 2412–2420. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170095>.
- Capper, P., Willoughby, A., 2011. Solar cells: Materials, manufacture and operation. *Springer*, ISBN: 978-1-84882-671-7.
- Chae, J., Kim, D. Y., Kim, S., & Kang, M., 2010. Photovoltaic efficiency on dye-sensitized solar cells (DSSC) assembled using Ga-incorporated TiO₂ materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(6), 906–911. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.09.012>.
- Chaoumead, A., Park, H. D., Joo, B. H., Kwak, D. J., Park, M. W., & Sung, Y. M. 2013. Structural and electrical properties of titanium-doped indium oxide films deposited by RF sputtering. *Energy Procedia*, 34, 572-581. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.787>.
- Chen, A., Zhu, K., Zhong, H., Shao, Q., & Ge, G. 2014. A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering. *Solar energy materials and solar cells*, 120, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.036>.
- Chen, A., Zhu, K., Zhong, H., Shao, Q., & Ge, G., 2014, A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120(PART A), 157–162. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2013.08.036>.
- Chen, D., Jiang, Y., Sun, Z., Huang, Y., Yu, J., & Chen, T. 2022. ITO/Ag/ITO and ITO/Cu/ITO transparent rear contacts for semi-transparent perovskite solar cells. *Thin Solid Films*, 752, 139252. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139252>.
- Chen, Y., Zhou, Y., Zhang, Q., Zhu, M., & Liu, F., 2007, The correlation between preferred orientation and performance of ITO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 18(1), 411–414. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9231-7>.
- Chen, Z. W., Lai, J. K. L., & Shek, C. H., 2005, Multifractal spectra of scanning electron microscope images of SnO₂ thin films prepared by pulsed laser deposition. *Physics Letters A*, 345(1), 218–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physleta.2005.05.104>.

- Chopra, K. L., Major, S., & Pandya, D. K., 1983, Transparent conductors—A status review. *Thin Solid Films*, 102(1), 1–46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090\(83\)90256-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(83)90256-0).
- Chu, J. B., Huang, S. M., Zhu, H. B., Xu, X. B., Sun, Z., Chen, Y. W., & Huang, F. Q., 2008, Preparation of indium tin oxide thin films without external heating for application in solar cells. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(52), 5480–5484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.08.011>.
- Craciun, V., Craciun, D., Wang, X., Anderson, T. J., & Singh, R. K., 2004, Highly conducting indium tin oxide films grown by ultraviolet-assisted pulsed laser deposition at low temperatures. *Thin Solid Films*, 453–454, 256–261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.132>.
- Damgaci, E., Kartal, E., Gucluer, F., Seyhan, A., & Kaplan, Y. 2024. Impact of temperature optimization of ITO thin film on tandem solar cell efficiency. *Materials*, 17(11), 2784. <https://doi.org/10.3390/ma17112784>.
- Dawar, A. L., & Joshi, J. C., 1984, Semiconducting transparent thin films: their properties and applications. *Journal of Materials Science*, 19(1), 1–23. <https://doi.org/10.1007/BF00552989>.
- Del Villar, I., Zamarreño, C. R., Hernaez, M., Sanchez, P., Arregui, F. J., & Matias, I. R., 2015, Generation of surface plasmon resonance and lossy mode resonance by thermal treatment of ITO thin-films. *Optics & Laser Technology*, 69, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2014.12.012>.
- Demirhan, Y., Koseoglu, H., Turkoglu, F., Uyanik, Z., Ozdemir, M., Aygun, G., & Ozyuzer, L. 2020. The controllable deposition of large area roll-to-roll sputtered ITO thin films for photovoltaic applications. *Renewable Energy*, 146, 1549–1559. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.038>.
- Edwards, P. P., Porch, A., Jones, M. O., Morgan, D. V., & Perks, R. M., 2004, Basic materials physics of transparent conducting oxides. *Dalton Trans.*, 19, 2995–3002. <https://doi.org/10.1039/B408864F>.
- El Hichou, A., Kachouane, A., Bubendorff, J. L., Addou, M., Ebothe, J., Troyon, M., & Bougrine, A., 2004, Effect of substrate temperature on electrical, structural, optical and cathodoluminescent properties of In₂O₃-Sn thin films prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 458(1), 263–268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.12.067>.
- Ellmer, K., 2007, Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes. *Nature Photonics*.
- Elmas, S., Korkmaz, Ş., & Pat, S., 2013, Optical characterization of deposited ITO thin films on glass and PET substrates. *Applied Surface Science*, 276, 641–645. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2013.03.146>.

- Enoki, H., Nakayama, T., & Echigoya, J., 1992, The electrical and optical properties of the ZnO-SnO₂ thin films prepared by RF magnetron sputtering. *Physica Status Solidi (a)*, 129(1), 181–191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pssa.2211290116>.
- Erjing, Z., Weijia, Z., Jun, L., Dongjie, Y., Jacques, H. J., & Jing, Z., 2011, Preparation of ITO thin films applied in nanocrystalline silicon solar cells. *Vacuum*, 86(3), 290–294. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2011.06.019>.
- Eshaghi, A., & Graeli, A., 2014, Optical and electrical properties of indium tin oxide (ITO) nanostructured thin films deposited on polycarbonate substrates “thickness effect.” *Optik*, 125(3), 1478–1481. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2013.09.011>.
- Fang, T.-H., & Chang, W.-J., 2003, Effect of freon flow rate on tin oxide thin films deposited by chemical vapor deposition. *Applied Surface Science*, 220(1), 175–180. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00817-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00817-1).
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S., 2007, The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>.
- Ghafouri, V., Shariati, M., & Ebrahimzad, A., 2012, Photoluminescence investigation of crystalline undoped ZnO nanostructures constructed by RF sputtering. *Scientia Iranica*, 19(3), 934–942. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.04.017>.
- Gheidari, A. M., Behafarid, F., Kavei, G., & Kazemzad, M., 2007, Effect of sputtering pressure and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin films. *Materials Science and Engineering: B*, 136(1), 37–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.08.058>.
- Ginley, D.S., Hosono, H., Paine, D.C., 2010, Handbook of transparent conductors. *Springer*, ISBN: 978-1-4419-1637-5.
- Gulen, M., Yildirim, G., Bal, S., Varilci, A., Belenli, I., & Oz, M., 2013, Role of annealing temperature on microstructural and electro-optical properties of ITO films produced by sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(2), 467–474. <https://doi.org/10.1007/s10854-012-0768-8>.
- Hamrit, S., Djessas, K., Brihi, N., Viallet, B., Medjnoun, K., & Grillo, S. E. 2016. The effect of thickness on the physico-chemical properties of nanostructured ZnO: Al TCO thin films deposited on flexible PEN substrates by RF-magnetron sputtering from a nanopowder target. *Ceramics International*, 42(14), 16212-16219. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.143>.
- Han, C., Zhao, Y., Mazzarella, L., Santbergen, R., Montes, A., Procel, P., ... & Isabella, O. 2021. Room-temperature sputtered tungsten-doped indium oxide for improved current in silicon heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 227, 111082. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111082>.
- Hartnagel, H. L., 1995, Semiconducting transparent thin films. *Semantic Scholar*.
- Holmberg, K., Matthews, A., 1997, Coating tribology. *Elsevier*, 258-308.

- Hosono, H., Ohta, H., Orita, M., Ueda, K., & Hirano, M., 2002, Frontier of transparent conductive oxide thin films. *Vacuum*, 66(3), 419–425. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00165-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00165-3).
- Hosseini-Babaei, F., & Amini, A., 2012, A breakthrough in gas diagnosis with a temperature-modulated generic metal oxide gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 166–167, 419–425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.02.082>.
- Houng, B., Lin, S.L., Chen, S.W., Wang, A., 2011, Influence of an In₂O₃ buffer layer on the properties of ITO thin films. *Ceramics International*, 37 3397–3403.
- Hrostea, L., Boclinca, M., Socol, M., Leontie, L., Stanculescu, A., & Girtan, M. 2017. Oxide/metal/oxide electrodes for solar cell applications. *Solar energy*, 146, 464-469. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.017>.
- Hu, X. L., Liu, L., Wang, H., & Zhang, X. C., 2015, Effects of pre-annealed ITO film on the electrical characteristics of high-reflectance Ni/Ag/Ni/Au contacts to p-type GaN. *Applied Surface Science*, 357, 1703–1707. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.09.186>.
- Huo, F., Muydinov, R., Seibertz, B. B. O., Wang, C., Hartig, M., Alkash, N., ... & Szyszka, B. 2024. Tantalum-doped tin oxide thin films using hollow cathode gas flow sputtering technology. *Heliyon*, 10(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30943>.
- Hussain, S. Q., Oh, W.-K., Ahn, S., Le, A. H. T., Kim, S., Iftiqar, S. M., Velumani, S., Lee, Y., & Yi, J., 2014, Highly transparent RF magnetron-sputtered indium tin oxide films for a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells amorphous/crystalline silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 24, 225–230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.02.044>.
- Hussain, S. Q., Oh, W.-K., Ahn, S., Le, A. H. T., Kim, S., Iftiqar, S. M., Velumani, S., Lee, Y., & Yi, J., 2014, Highly transparent RF magnetron-sputtered indium tin oxide films for a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells amorphous/crystalline silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 24, 225–230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.02.044>.
- Hussain, S. Q., Oh, W.-K., Ahn, S., Le, A. H. T., Kim, S., Lee, Y., & Yi, J., 2014, RF magnetron sputtered indium tin oxide films with high transmittance and work function for a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells. *Vacuum*, 101, 18–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.07.004>.
- Jäger, T., Bissig, B., Döbeli, M., Tiwari, A. N., & Romanyuk, Y. E., 2014, Thin films of SnO₂:F by reactive magnetron sputtering with rapid thermal post-annealing. *Thin Solid Films*, 553, 21–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.12.038>.
- Jiao, P., Li, S., Zhu, G., Xu, H., Wang, K., Zhao, Y., ... & Huang, Y. 2024. Effect of in layer thickness on the photoelectric properties of indium tin oxide (ITO)/In/ITO

- multilayer films. *Thin Solid Films*, 789, 140172. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.140172>.
- Kamei, M., Enomoto, H., & Yasui, I., 2001, Origin of the crystalline orientation dependence of the electrical properties in tin-doped indium oxide films. *Thin Solid Films*, 392(2), 265–268. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01041-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01041-0)
- Kashyout, A. E.-H. B., Fathy, M., & Soliman, M. B., 2011, Studying the properties of RF-sputtered nanocrystalline tin-doped indium oxide. *International Journal of Photoenergy*, 2011, 139374. <https://doi.org/10.1155/2011/139374>.
- Kawazoe, H., Yasukawa, M., Hyodo, H., Kurita, M., Yanagi, H., & Hosono, H., 1997, P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂. *Nature*, 389(6654), 939–942. <https://doi.org/10.1038/40087>.
- Khelladi, M. R., Mentar, L., Boubatra, M., Azizi, A., & Kahoul, A., 2010, Early stages of cobalt electrodeposition on FTO and n-type Si substrates in sulfate medium. *Materials Chemistry and Physics*, 122(2), 449–453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.03.023>.
- Kim, Y. J., Jin, S. B., Kim, S. I., Choi, Y. S., Choi, I. S., & Han, J. G., 2010, Effect of oxygen flow rate on ITO thin films deposited by facing targets sputtering. *Thin Solid Films*, 518(22), 6241–6244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.03.041>.
- Kong, J., Deng, H., Yang, P., & Chu, J., 2009, Synthesis and properties of pure and antimony-doped tin dioxide thin films fabricated by sol–gel technique on silicon wafer. *Materials Chemistry and Physics*, 114(2), 854–859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.049>.
- Koseoglu, H., Turkoglu, F., Kurt, M., Yaman, M. D., Akca, F. G., Aygun, G., & Ozyuzer, L., 2015, Improvement of optical and electrical properties of ITO thin films by electro-annealing. *Vacuum*, 120, 8–13. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2015.06.027>.
- Kumar, K. J., Raju, N. R. C., & Subrahmanyam, A. 2011. Thickness dependent physical and photocatalytic properties of ITO thin films prepared by reactive DC magnetron sputtering. *Applied surface science*, 257(7), 3075-3080. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.119>.
- Kumar, K. J., Raju, N. R. C., & Subrahmanyam, A., 2011, Thickness dependent physical and photocatalytic properties of ITO thin films prepared by reactive DC magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 257(7), 3075–3080. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.119>.
- Li, B. J., Huang, L. J., Ren, N. F., & Zhou, M. 2014. Titanium dioxide-coated fluorine-doped tin oxide thin films for improving overall photoelectric property. *Applied Surface Science*, 290, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.001>.
- Lin, H. K., & Hsu, W. C., 2014, Electrode patterning of ITO thin films by high repetition rate fiber laser. *Applied Surface Science*, 308, 58–62. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.04.084>.

- Liu, Y., Akin, S., Hinderhofer, A., Eickemeyer, F. T., Zhu, H., Seo, J., Zhang, J., Schreiber, F., Zhang, H., Zakeeruddin, S. M., Hagfeldt, A., Dar, M. I., & Grätzel, M., 2020, Stabilization of highly efficient and stable phase-pure FAPbI₃ perovskite solar cells by molecularly tailored 2D-overlayers. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15688–15694. <https://doi.org/10.1002/anie.202005211>.
- Lu, H. C., Mao, J. W., & Chiang, Y. C., 2013, Low temperature preparation of ITO thin films by the coating solutions containing solvothermally synthesized ITO nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 231, 526–530. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2012.04.049>.
- Madhi, I., Meddeb, W., Bouzid, B., Saadoun, M., & Bessaïs, B., 2015, Effect of temperature and NO₂ surface adsorption on electrical properties of screen printed ITO thin film. *Applied Surface Science*, 355, 242–249. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.07.135>.
- Marikkannu, S., Kashif, M., Sethupathy, N., Vidhya, V. S., Piraman, S., Ayeshamariam, A., Bououdina, M., Ahmed, N. M., & Jayachandran, M., 2014, Effect of substrate temperature on indium tin oxide (ITO) thin films deposited by jet nebulizer spray pyrolysis and solar cell application. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 27, 562–568. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.07.036>.
- McGhee, J. R., Sagu, J. S., Southee, D. J., & Wijayantha, K. G. U. 2018. Humidity sensing properties of transparent sputter-coated indium–tin oxide and printed polymer structures. *IEEE Sensors Journal*, 18(18), 7358–7364. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2858021>.
- Minami, T., 2000, New n-type transparent conducting oxides. *MRS Bulletin*.
- Minami, T., 2005, Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes. *Semiconductor Science and Technology*, 20(4), S35. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/4/004>.
- Minami, T., Nanto, H., & Takata, S., 1984, Highly conductive and transparent aluminum doped zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering. *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(5A), L280. <https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L280>.
- Minami, T., Nanto, H., Shooji, S., & Takata, S., 1984, The stability of zinc oxide transparent electrodes fabricated by R.F. magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 111(2), 167–174. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090\(84\)90484-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(84)90484-X).
- Moholkar, A. V., Pawar, S. M., Rajpure, K. Y., & Bhosale, C. H., 2007, Effect of solvent ratio on the properties of highly oriented sprayed fluorine-doped tin oxide thin films. *Materials Letters*, 61(14), 3030–3036. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.10.077>.
- Morán-Pedroso, M., Gago, R., Julin, J., Salas-Colera, E., Jimenez, I., De Andrés, A., & Prieto, C. 2021. Correlated effects of fluorine and hydrogen in fluorinated tin oxide (FTO) transparent electrodes deposited by sputtering at room temperature. *Applied Surface Science*, 537, 147906. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147906>.

- Mostafa Hosseinpour-Mashkani, S., Maddahfar, M., & Sobhani-Nasab, A., 2016, Novel silver-doped CdMoO₄: synthesis, characterization, and its photocatalytic performance for methyl orange degradation through the sonochemical method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 474–480. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3776-7>
- Nazeeruddin, Md. K., Baranoff, E., & Grätzel, M., 2011, Dye-sensitized solar cells: A brief overview. *Solar Energy*, 85(6), 1172–1178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.01.018>.
- Nisha, M., Vanaja, K. A., Sanal, K. C., Saji, K. J., Aneesh, P. M., & Jayaraj, M. K., 2010, Growth of ITO thin films on polyimide substrate by bias sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13(1), 64–69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2010.02.009>.
- Okada, K., Kohiki, S., Luo, S., Sekiba, D., Ishii, S., Mitome, M., Kohno, A., Tajiri, T., & Shoji, F., 2011, Correlation between resistivity and oxygen vacancy of hydrogen-doped indium tin oxide thin films. *Thin Solid Films*, 519(11), 3557–3561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.249>.
- Park, H. K., Jeong, J. A., Park, Y. S., Kim, H. K., & Cho, W. J. 2009. Electrical, optical, and structural properties of InZnSnO electrode films grown by unbalanced radio frequency magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 517(18), 5563–5568. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.02.138>.
- Park, S. H., Lee, S. J., Lee, J. H., Kal, J., Hahn, J., & Kim, H. K. 2016. Large area roll-to-roll sputtering of transparent ITO/Ag/ITO cathodes for flexible inverted organic solar cell modules. *Organic Electronics*, 30, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.12.009>.
- Park, Y. S., Kim, E., Hong, B., & Lee, J., 2013, Characteristics of ITO films with oxygen plasma treatment for thin film solar cell applications. *Materials Research Bulletin*, 48(12), 5115–5120. <https://doi.org/10.1016/J.MATERRESBULL.2013.07.026>.
- Reddy, S. H., Di Giacomo, F., Matteocci, F., Castriotta, L. A., & Di Carlo, A. 2022. Holistic approach toward a damage-less sputtered indium tin oxide barrier layer for high-stability inverted perovskite solar cells and modules. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(45), 51438–51448. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c10251>.
- Robb, A. J., Duca, Z. A., White, N., Woodell, P., & Ward, P. A. 2024. Influence of oxygen on the optical and electrical properties of magnetron-sputtered indium tin oxide thin films at ambient temperature. *Thin Solid Films*, 788, 140152. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.140152>.
- Rozati, S. M., & Ganj, T., 2004, Transparent conductive Sn-doped indium oxide thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Renewable Energy*, 29(10), 1671–1676. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.01.008>.
- Russo, B., & Cao, G. Z., 2008, Fabrication and characterization of fluorine-doped thin oxide thin films and nanorod arrays via spray pyrolysis. *Applied Physics A*, 90(2), 311–315. <https://doi.org/10.1007/s00339-007-4274-4>.

- Sato, H., Minami, T., Takata, S., & Yamada, T., 1993, Transparent conducting p-type NiO thin films prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 236(1), 27–31. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90636-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90636-4).
- Seyhan, A., & Kartal, E. 2023. Optical, Electrical and Structural Properties of ITO/IZO and IZO/ITO Multilayer Transparent Conductive Oxide Films Deposited via Radiofrequency Magnetron Sputtering. *Coatings*, 13(10), 1719. <https://doi.org/10.3390/coatings13101719>.
- Sibin, K. P., Swain, N., Chowdhury, P., Dey, A., Sridhara, N., Shashikala, H. D., Sharma, A. K., & Barshilia, H. C., 2016, Optical and electrical properties of ITO thin films sputtered on flexible FEP substrate as passive thermal control system for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 145, 314–322. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2015.10.035>.
- Song, S., Yang, T., Liu, J., Xin, Y., Li, Y., & Han, S., 2011, Rapid thermal annealing of ITO films. *Applied Surface Science*, 257(16), 7061–7064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.03.009>.
- Sousa, M. G., & Da Cunha, A. F. 2019. Optimization of low temperature RF-magnetron sputtering of indium tin oxide films for solar cell applications. *Applied Surface Science*, 484, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.275>.
- Tak, Y.-H., Kim, K.-B., Park, H.-G., Lee, K.-H., & Lee, J.-R., 2002, Criteria for ITO (indium–tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode. *Thin Solid Films*, 411(1), 12–16. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00165-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00165-7).
- Teixeira, V., Cui, H. N., Meng, L. J., Fortunato, E., & Martins, R. 2002. Amorphous ITO thin films prepared by DC sputtering for electrochromic applications. *Thin Solid Films*, 420, 70-75. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00656-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00656-9).
- Varnamkhandi, M. G., & Soleimanian, V., 2015, Microstructure, electrical and optoelectronic characterizations of transparent conductive nanocrystalline Sn thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(5), 3223–3230. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2820-y>.
- Viespe, C., Nicolae, I., Sima, C., Grigoriu, C., & Medianu, R., 2007, ITO thin films deposited by advanced pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 515(24), 8771–8775. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.03.167>.
- Wang, H., Tang, C., Shi, Q., Wei, M., Su, Y., Lin, S., & Dai, M. 2021. Influence of Ag incorporation on the structural, optical and electrical properties of ITO/Ag/ITO multilayers for inorganic all-solid-state electrochromic devices. *Ceramics International*, 47(6), 7666-7673. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.109>.
- Wei, L., & Shuying, C., 2011, Photoelectric properties of ITO thin films deposited by DC magnetron sputtering. *Journal of Semiconductors*, 32(1), 13002. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/1/013002>.
- Werner, J., Dubuis, G., Walter, A., Löper, P., Moon, S. J., Nicolay, S., ... & Ballif, C. 2015. Sputtered rear electrode with broadband transparency for perovskite solar

- cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141, 407-413. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.024>.
- Winnicki, M., Wiatrowski, A., & Mazur, M. 2021. High power impulse magnetron sputtering of In₂O₃/Sn cold sprayed composite target. *Materials*, 14, 1228. <https://doi.org/10.3390/ma14051228>.
- Wu, C. C. 2018. Highly flexible touch screen panel fabricated with silver-inserted transparent ITO triple-layer structures. *RSC advances*, 8(22), 11862-11870. <https://doi.org/10.1039/C7RA13550E>.
- Xiang, W., Wang, Z., Kubicki, D. J., Tress, W., Luo, J., Prochowicz, D., Akin, S., Emsley, L., Zhou, J., Dietler, G., Grätzel, M., & Hagfeldt, A., 2019, Europium-doped CsPbI₂Br for stable and highly efficient inorganic perovskite solar cells. *Joule*, 3(1), 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.008>.
- Xu, J., Yang, Z., Wang, H., Xu, H., & Zhang, X., 2014, Effect of growth temperature and coating cycles on structural, electrical, optical properties and stability of ITO films deposited by magnetron sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 21, 104–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.007>.
- Yadav, A. A., Masumdar, E. U., Moholkar, A. V., Rajpure, K. Y., & Bhosale, C. H., 2009, Effect of quantity of spraying solution on the properties of spray deposited fluorine doped tin oxide thin films. *Physica B: Condensed Matter*, 404(12), 1874–1877. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.03.006>.
- Yan, C., Su, Z., Zhao, Z., and Zhou, Y., 2024, Improving optical and electrical stabilities of fluorine-doped tin oxide films in sweat solutions with O₂ addition in plasma, *Journal of Physics D: Applied Physics*, <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad6f22>.
- Yang, S., Zhang, W., Xie, B., yao Xiong, M., Kong, W., & Sun, Z. 2023. Effect of the sputtering gas temperature on the properties of indium tin oxide films. *Thin Solid Films*, 772, 139789. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139789>.
- Yao, Z., Duan, W., Steuter, P., Hüpkes, J., Lambertz, A., Bittkau, K., ... & Ding, K. 2021. Influence of oxygen on sputtered titanium-doped indium oxide thin films and their application in silicon heterojunction solar cells. *Solar RRL*, 5(1), 2000501. <https://doi.org/10.1002/solr.202000501>.
- Zhu, B. L., Cai, X. J., Wang, C. C., Wu, J., Yao, J. L., & Sun, W. Q. 2024. Optimization of transparent conductive properties of magnetron sputtered Sb-doped SnO₂ films by RF power: Towards application in polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) films. *Optical Materials*, 150, 115262. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115262>.
- Zhu, B. L., Peng, H., Tao, Y., Wu, J., & Shi, X. W., 2022, Highly transparent conductive F-doped SnO₂ films prepared on polymer substrate by radio frequency reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 756, 139360. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139360>.
- Zhu, B. L., Zhao, X., Hu, W. C., Li, T. T., Wu, J., Gan, Z. H., Liu, J., Zeng, D. W., & Xie, C. S., 2017, Structural, electrical, and optical properties of F-doped SnO or

- SnO₂ films prepared by RF reactive magnetron sputtering at different substrate temperatures and O₂ fluxes. *Journal of Alloys and Compounds*, 719, 429–437. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.193>.
- Zhu, G., & Yang, Z., 2013, Effect of sputtering power and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin films prepared from radio frequency sputtering using powder target. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(10), 3646–3651. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1298-8>.

